NUEVA PERSPECTIVA PARA LA ENFERMEDAD DE PARKINSON

INVESTIGACION y CIENCIA

SEPTIEMBRE 2005
6,00 EUROS

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



ESTRATIGRAFIA Y RELIEVE DE MARTE

LA FISICA Y LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN

LOS MISTERIOS DE LA MASA

ASI CRECIAN LOS DINOSAURIOS



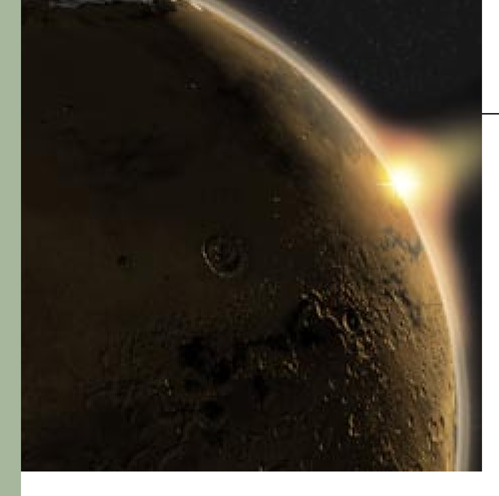
00348
9 770210 136004



Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN

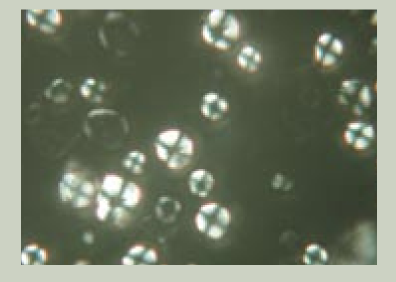
Septiembre de 2005

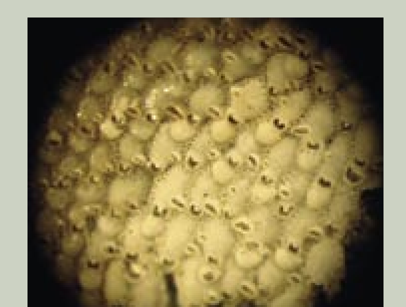
Número 348



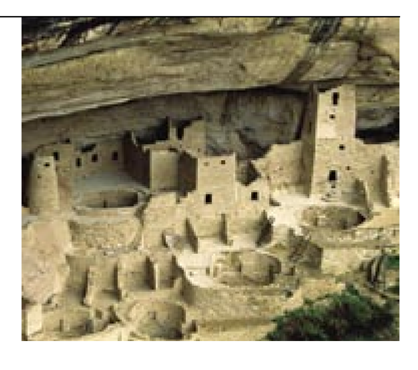


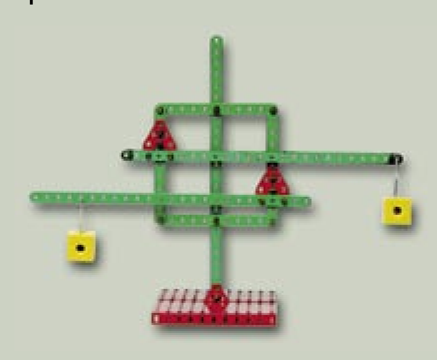


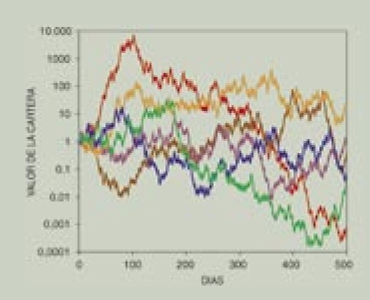




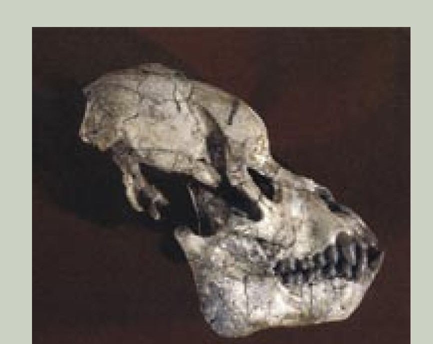







VALOR DE LA CARTERA
10.000
1000
100
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0
100
200
300
400
500
DIAS







DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
GENERAL MANAGER Michael Florek
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN John Sargent

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

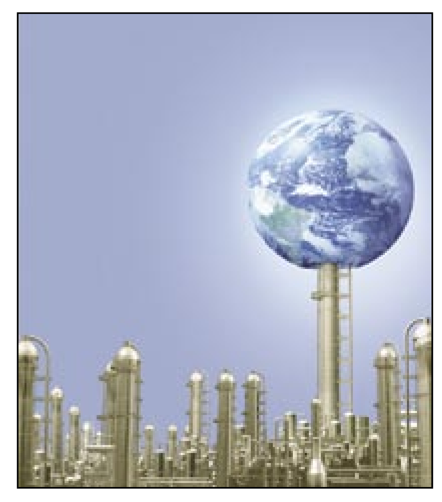
Madrid:
Manuel Martín Martín
Teléfono 670 236 715
e-mail: publicidad-ic@hotmail.com

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

M.ª Rosa Zapatero: *Estratigrafía y relieve de Marte*; Ramón Pascual: *Los misterios de la masa* y *La física y los diagramas de Feynman*; Manuel Puigcerver: *Almacenamiento del dióxido de carbono bajo tierra*; Joandomènec Ros: *Así crecían los dinosaurios*; Juan Manuel González Mañas: *Nueva perspectiva para la enfermedad de Parkinson*; Luis Bou: *Simulación teórica de sociedades antiguas*; J. Vilardell: *Hace...*, *Apuntes* e *Ideas aplicadas*; Jürgen Goicoechea: *Curiosidades de la física*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	90,00 euro	170,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España



HACE

...cincuenta años

TIERRA Y GEOFÍSICA. «La histórica decisión de los expertos estadounidenses de acometer el lanzamiento de un satélite artificial antes de tres años simboliza la creciente capacidad del hombre de contemplar la Tierra en su conjunto. Tal capacidad se expresa también en los planes para celebrar en 1957 el Año Internacional de la Geofísica. En el frontispicio de este número se muestra a un hombre que sostiene un mapa de navegación polinesio que representa una región en torno a las islas Marshall. Tras el mapa se ve un globo terráqueo concebido hacia el año 145 a.C. por Crates de Mallos. En éste, la Tierra aparece dividida en cuatros partes separadas por océanos. Preveía así, poéticamente, el descubrimiento de América del Norte, América del Sur y Australia.»

EN BUSCA DEL NORTE. «Desde hace pocos años podemos acceder al registro magnético de la Tierra, integrado por una suerte de agujas de brújula que la naturaleza inmovilizó en el interior de las rocas. Leyendo esos imanes en rocas de distintos lugares del planeta, hallamos rastros de pasmosos cambios en el campo magnético terrestre. ¡Durante el Terciario (transcurrido entre hace sesenta y un millón de años) los polos geomagnéticos norte y sur intercambiaron su posición en varias ocasiones! —S. Keith Runcom»

CONJETURAS CONTINENTALES. «Parece que al principio todo era un océano, en el que los continentes emergieron en forma de pequeñas islas. Acaso tensiones mecánicas sobre la superficie de la entonces totalmente acuática Tierra hicieron que aquélla se combara, originando depresiones, cadenas montañosas, pliegues y fisuras. Seguidamente, la erosión a cargo de una atmósfera rica en oxígeno habría segregado en forma de sedimentos los materiales más ácidos de esas cadenas. Los sedimentos graníticos, depositados a lo largo de los bordes de las tierras elevadas, habrían formado las primeras zonas graníticas del planeta.»

...cien años

AGUA. «Aparte de conmemorarse la batalla de Bunker Hill, el 17 de junio de 1905 constituyó una jornada histórica para el progreso del estado de Nevada, pues fue cuando el Canal Truckee, el inmenso conducto de riego construido por el gobierno, recibió las primeras aguas procedentes del río Truckee. Los indios no se verán afectados, aun cuando el lago Pirámide se secara tras el desvío de su arteria principal, el río Truckee, hacia los canales de irrigación. Cuando el lago se seque, si ello ocurre alguna vez, los indios dispondrán de agua procedente del sistema de irrigación. Por tanto, no hay motivo de alarma en lo que respecta a los indios en el caso de que el lago Pirámide se seque.» [Nota de la redacción: En 1967 los indios paiute, alarmados por la desecación del lago, iniciaron una serie de pleitos para invertir el proceso.]

...ciento cincuenta años

ORO PARA MORSE. «El emperador de Austria ha concedido al profesor Morse la gran medalla de oro de las artes y las ciencias en reconocimiento a sus valiosos servicios a la ciencia merced a su sistema de telegrafía, que ha sido extensamente aplicado en los dominios austríacos. Apenas han transcurrido doce años desde que se efectuaron los primeros experimentos públicos de la telegrafía eléctrica del profesor Morse entre Baltimore y Washington. Hoy operan unos 80.000 kilómetros de cable, que se extienden bajo los mares y sobre las montañas, llegando a casi todos los lugares del mundo habitable. El telégrafo eléctrico constituye la maravilla de nuestra época.»



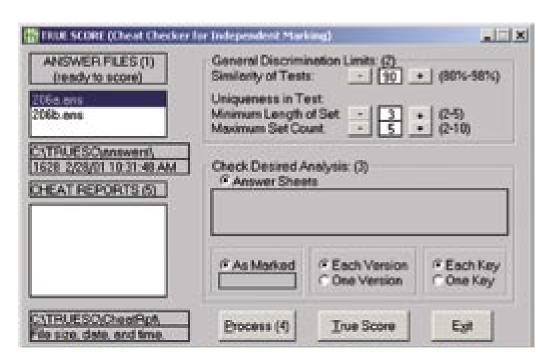
Dos mapas de la Tierra, uno polinesio y otro de la Grecia clásica, aparecían en el frontispicio del monográfico dedicado a la geofísica de 1955.

ATENCIÓN INVENTORES. «Aprovechamos la ocasión para hacer una prudente advertencia a los inventores acerca del asunto de las sierras para mármol. A raíz de la generosa oferta de 10.000 dólares hecha por el señor Manly por la mejor sierra mecánica, el mundo de la invención entero está en ascuas. Parece haberse generalizado la opinión de que nunca se ha planteado a un hombre tarea más fácil que ganar ese premio. Nuestras observaciones no pretenden desanimar a nadie, sino estimular el pensamiento y la observación atenta. Las formas más primitivas de disponer las sierras ya están inventadas. Hay tiempo y espacio sobrados para un despliegue de ingenio auténtico.»

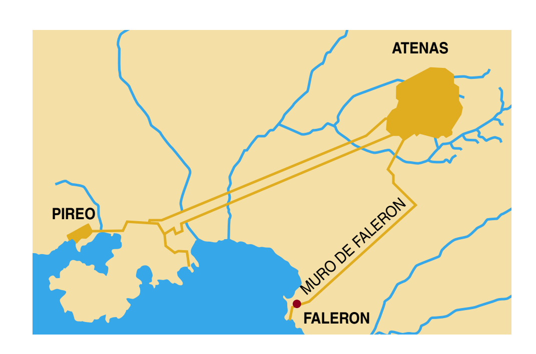
APUNTES

INFORMATICA
Programa antiplagio

Según una información de *Nature* el plagio, y muy en especial el autoplagio, afecte quizás, en mayor o menor grado, a una quinta parte de las publicaciones. Hace un par de años, por ejemplo, se descubrió que un físico indio, vicerrector de una universidad, había publicado en revistas internacionales artículos que plagiaban trabajos de teóricos bien conocidos, como Renata Kallosh. Arxiv, el archivo de Internet gratuito donde aparecen casi todos los artículos de la mayor parte de las ramas de la física por primera vez, va a establecer una inspección informática para detectar plagios. El programa, escrito por una estudiante de informática de Cornell, la universidad que se encarga de Arxiv, detecta coincidencias de ristras de al menos seis palabras, si bien evita las frases hechas. Los ensayos efectuados hasta ahora han revelado miles de pares de artículos con demasiadas coincidencias; eso sí, Paul Ginsparg, el fundador y responsable de Arxiv, explica que no les interesa tanto el autoplagio —que se solapen textos de un mismo autor en un archivo tan exhaustivo no siempre es vergonzoso— como el puro plagio.



El programa Cheat Checker, de Nine-Patch Software, detecta coincidencias sospechosas entre exámenes. Otros buscarán plagios en los artículos científicos.

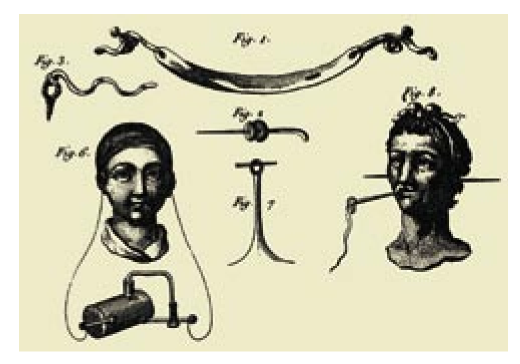


ARQUEOLOGIA
El puerto de Teseo

En las afueras de la capital griega se han localizado restos de Falerón. Fue el puerto de Atenas desde la época micénica (siglos XVI-XIII antes de Cristo) hasta el siglo V antes de Cristo, en que lo sustituyó el Pireo. De allí partió Teseo hacia Creta. Se encuentra hoy 350 metros tierra adentro. Se han descubierto pequeñas estructuras, cerámica, rodadas de carros e indicios de fogones donde los viajeros debían de cocinar. El yacimiento cubre unos 300 metros en un terreno que se iba a edificar.

PSIQUIATRIA
Anomalías eléctricas

Parecerá a muchos que los electroshocks pertenecen sólo al mundo de las películas de terror, pero, bajo el nombre de terapia electroconvulsiva, son una práctica médica hasta cierto punto común. Se supone que es eficaz a corto plazo en depresiones severas, manías y catatonias, y se administra con el paciente anestesiado y relajado muscularmente para evitar lesiones. Entre los efectos secundarios figura la pérdida de memoria. Acerca del alcance de esta amnesia existe cierta confusión. El informe consensuado de los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses, de 1985, parecía inclinarse por la transitoriedad, si bien reconocía que los pacientes tenían a veces la impresión "subjetiva" de que habían perdido recuerdos. Un grupo de trabajo de la Asociación Americana de Psiquiatría recomendaba en 1990 que se les dijese a los enfermos que los efectos secundarios "probablemente" durarían poco. Una información para pacientes del Real Colegio de Psiquiatría británico afirmaba tajantemente que la amnesia siempre era temporal. Sin embargo, un artículo publicado en el *British Medical Journal* en 2003 criticaba expresamente ese documento, a lo que el Colegio replicó que las directrices de 2003 del Instituto para la Excelencia Médica británico, un organismo oficial, lo "respaldaban". Pero del texto que el propio Colegio reproduce no se colige eso. La clínica Mayo indica que puede afectar a los recuerdos de años anteriores a la terapia y, en algunos casos, ser permanente. Peggy Salters, enfermera precisamente de psiquiatría, hoy de sesenta años de edad, se sometió en 2000 a electroshocks a causa de una depresión con tendencias suicidas. Ha perdido los recuerdos de los últimos treinta años de su vida, incluidos todos los relativos a su esposo, ya fallecido, así como sus conocimientos profesionales. Un jurado, en contra de lo que ha ocurrido en demandas anteriores en Estados Unidos, ha considerado que los electroshocks causaron la amnesia de Salters, ha fallado en contra de un médico e impuesto una indemnización de más de 600.000 dólares en favor de la enfermera. Había ésta recibido 13 electroshocks en 19 días.



Grabado de *Médecine clinique* de Philippe Pinel

MEDICINA

Dolores de cabeza

Los dolores de cabeza no emanan en realidad del cerebro. Nacen de irritaciones en estructuras vecinas: la piel, las articulaciones, los músculos, los nervios o los vasos sanguíneos. El tejido cerebral, encerrado en el protector recinto del cráneo, no ha desarrollado en su evolución la capacidad de reaccionar a las sensaciones de presión. Los dolores de cabeza se clasifican en primarios y secundarios. Los secundarios son síntomas de otra dolencia. Hay numerosas causas, de un nervio pinzado a una sinusitis. La mayoría de las cefaleas, sin embargo, son primarias, es decir, no son síntomas, sino el problema en sí. En este caso, que abarca las cefaleas debidas a la tensión muscular y las migrañas, el dolor procede quizá de una misma ruta neuroquímica en el cerebro. La cadena empieza cuando los centros cerebrales del dolor se activan. Segregan serotonina y norepinefrina, que dilatan los vasos sanguíneos de las meninges que rodean el cerebro. El flujo sanguíneo crece. Al hincharse los vasos, tensan las neuronas circundantes y éstas emiten señales al sistema trigeminal, área del cerebro que controla los mensajes de dolor de la cabeza y el rostro. Sentimos entonces la cefalea. Otra cosa es por qué se inicia esta ruta. Algunas circunstancias hacen más probable el dolor de cabeza. Los desencadenantes pueden ser internos (los cambios hormonales durante la menstruación, por ejemplo) o procedentes del entorno (el estrés o la falta de sueño). La verdad es que aún no se sabe bien cómo se transforman esos desencadenantes en señales químicas. *—Dawn A. Marcus*



PALEONTOLOGIA

Un pez primitivo

Pasados 450 millones de años aún es bien visible la impresión que un pez, aunque no tuviese huesos ni dientes, dejó en un esquisto sudafricano: se reconocen claramente las escamas, los ojos y el hígado. Un equipo de la Universidad de Leicester ya había descubierto un fósil parecido en 1994, pero sólo ahora, al aparecer siete nuevos ejemplares, se ha percibido el significado de aquel hallazgo. Estos fósiles parecen representar una fase muy temprana en la evolución de los peces. Ni siquiera se habían constituido todavía las propiedades típicas de los vertebrados. En aquella época, Sudáfrica pasaba por una edad de hielo. Puesto que no tenían dientes, no debían de ser predadores; ingerirían lo que flotase en el agua de fundición de una capa de hielo que iba retrocediendo poco a poco. Faltan aún estudios más detallados e incluso un nombre científico para estos fósiles de peces, los más antiguos que se hayan descubierto en Africa. Aún más viejos son dos fósiles de peces hallados en China: de hace 530 millones de años. Eran también cartilaginosos.



Los ojos y las escamas demuestran que este fósil es de un pez agnato de hace 450 millones de años.

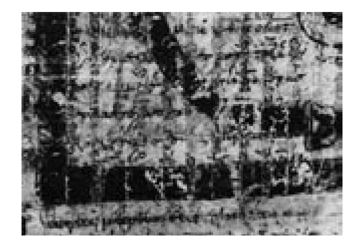
MATT COLLINS (*arriba*); RICHARD J. ALDRIDGE, UNIVERSIDAD DE LEICESTER (*centro*); CENTRO DEL ACELERADOR LINEAL DE STANFORD, ©PROPIETARIO DEL PALIMPSESTO DE ARQUIMEDES

FISICA E HISTORIA

El palimpsesto de Arquímedes

En el siglo X, alguien copió en Constantinopla, a partir de originales griegos, varias obras de Arquímedes, entre ellas "Los métodos de los teoremas mecánicos", conocida sólo por esta fuente, con extraordinarios cálculos infinitesimales, y el "Tratado sobre los cuerpos sumergidos", del que es la única fuente en el griego original. Se trata de las copias más antiguas de Arquímedes conocidas. Pero nos han llegado por caminos tortuosos. A finales del siglo XII desencuadernaron el libro, se borraron sus páginas con zumo de limón y piedra pómez, se las partió por la mitad y se escribieron sobre ellas exorcismos y plegarias para enfermos. Al menos desde el siglo XVI, el códice reescrito se hallaba en el monasterio de Mar Saba, en Tierra Santa, hasta que lo trasladaron en el XIX a la biblioteca del Patriarca Griego de Jerusalén. De allí pasaría enseguida a la casa filial en Constantinopla de la iglesia del Santo Sepulcro, donde el editor moderno de las obras de Arquímedes, Johan Heiberg, lo fotografiaría. Leyó la capa borrada del palimpsesto, con la ayuda sólo de una lupa, y publicó en 1907 los textos redescubiertos. Enseguida volvería a perderse de vista el códice, hasta que reapareció en París, donde permanecería en manos de un coleccionista privado. En 1998 salió a la venta y, tras un pleito entre la sala Christie's y el Patriarcado Griego, acabó, cedido por un comprador anónimo, en el museo Walters de Baltimore. Con luz ultravioleta se han podido ir rellenando las lagunas que no pudo leer Heiberg. Sin embargo, no se habían descifrado cuatro hojas, ocultas bajo ilustraciones falsificadas en el siglo XX. Uwe Bergmann las ha ido haciendo visibles aprovechando que la tinta de los textos de Arquímedes, de sólo una o dos micras de espesor, y la de los rezos contienen una hemoproteína que se torna fluorescente cuando se la somete a intensos rayos X de una energía concreta, generados en el laboratorio de radiación sincrotón del acelerador lineal de Stanford. Tras ello hay que separar la caligrafía del siglo X de la del siglo XII, de lo que se encarga el filólogo Reviel Netz.





Bajo esta ilustración falsa se encuentra un palimpsesto cuya capa más antigua contiene obras de Arquímedes.

Estratigrafía y relieve de Marte

Uno de los vehículos exploradores se encontró con un desierto antiguo; el otro, con un mundo antaño húmedo. La diversidad de Marte es digna de la terrestre

Philip R. Christensen

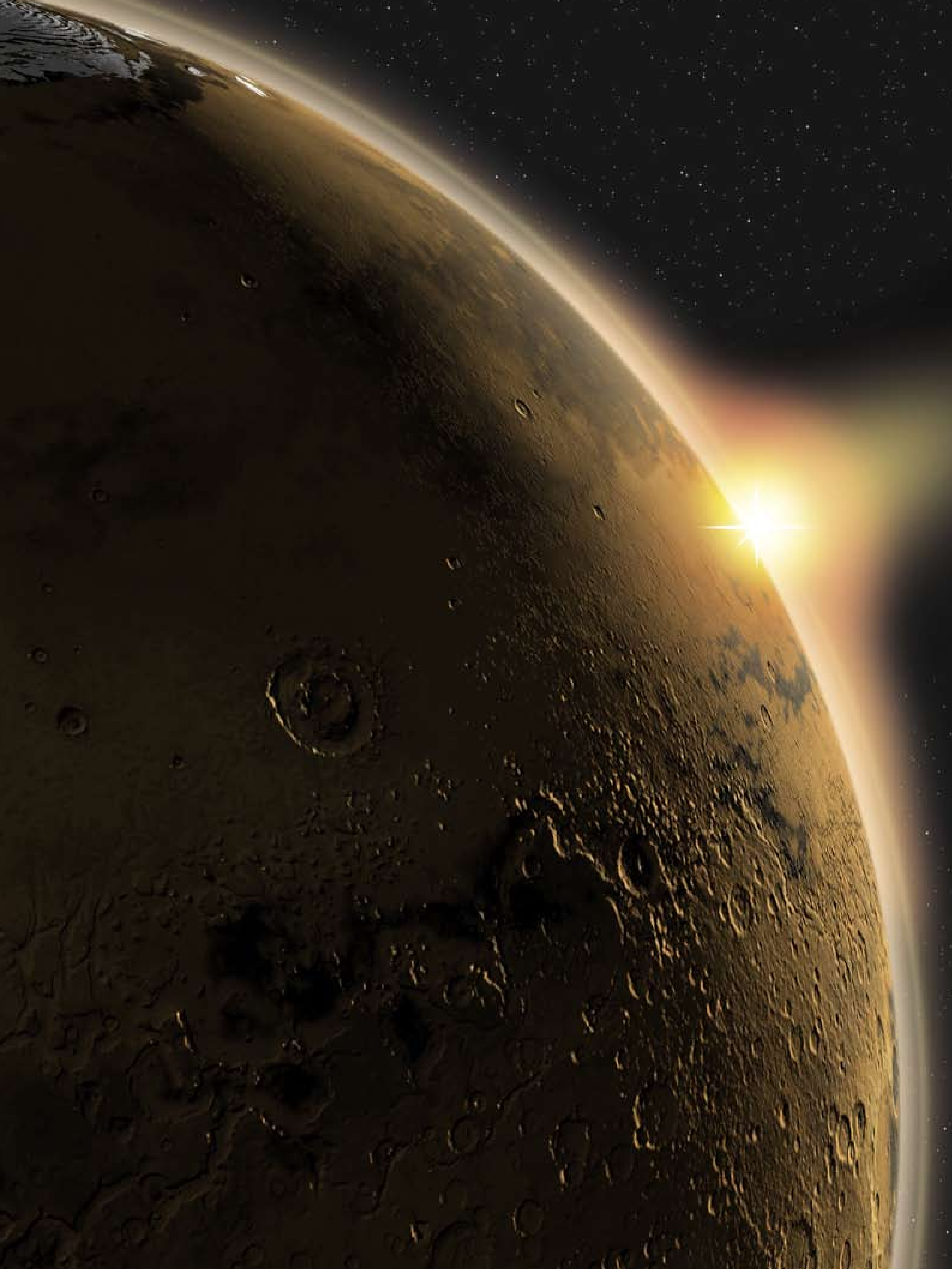
Muchos buscan en el desierto severidad y sencillez. A mí me interesa la complejidad. Las rocas del oeste de Arizona, donde trabajo, encierran una de las historias más intrincadas que haya habido en la Tierra. Las capas de piedra caliza, de carbonatos, de lodo sedimentado, de arena de cuarzo y de lava solidificada demuestran que, en los últimos 600 millones de años, esta región pasó de mar somero y cálido a ciénaga, que devino en desierto inmenso de dunas brillantes y ardientes, para constituirse luego en extensión de hielo y ésta, en mar somero de nuevo. Las erupciones volcánicas formaron islas como Japón; impelidas cerca de 200 kilómetros continente adentro a lo largo de fallas enormes, ladearon capas de roca que, al calentarse, produjeron mármol y cuarcita. La elevación del terreno y la erosión crearon por fin el paisaje desértico que apreciamos hoy día.

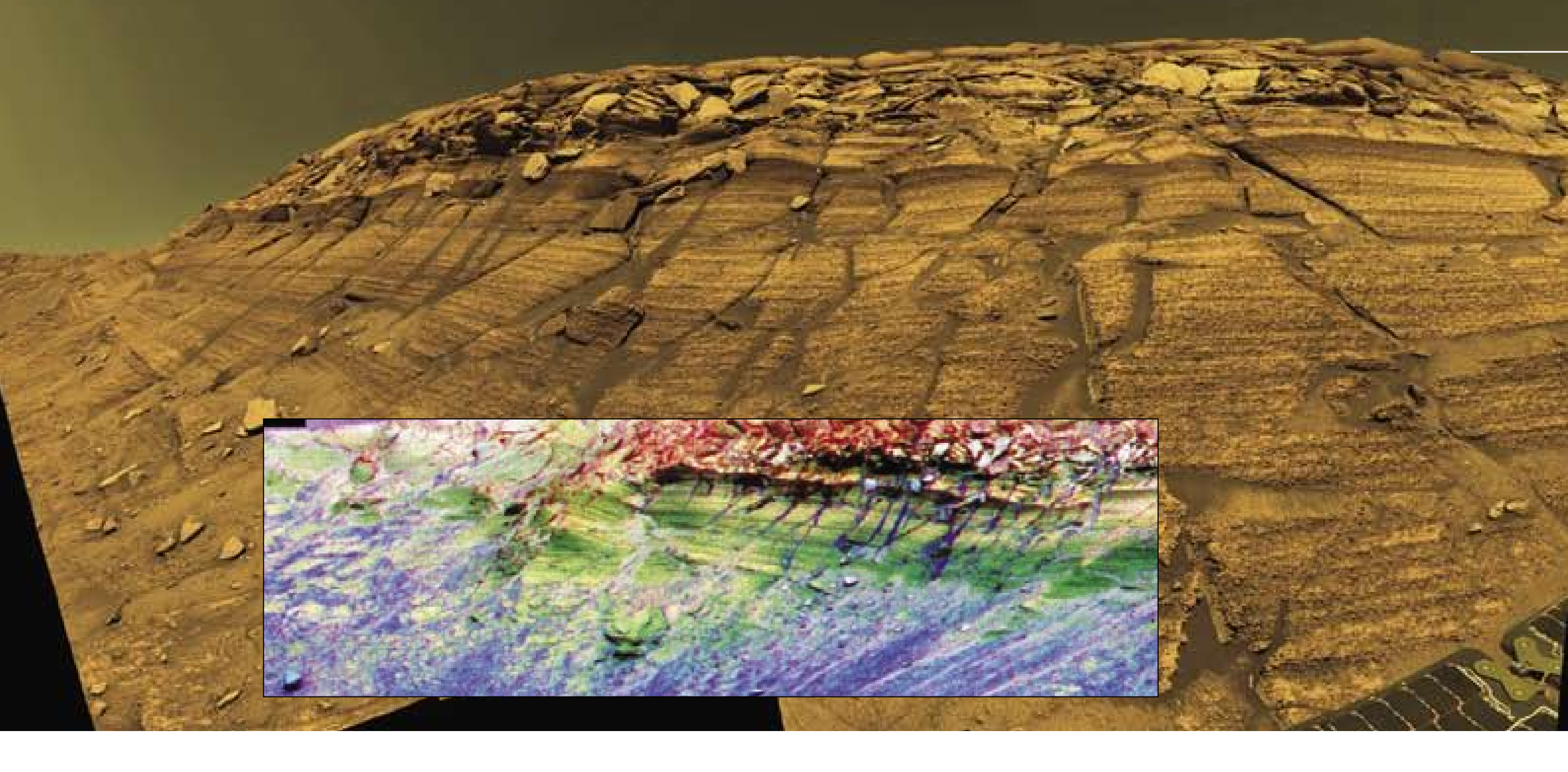
Semejante reconstrucción histórica, tan minuciosa, resultaba imposible en el caso de Marte. A lo largo de mi vida, he visto, sin embargo, cómo dejaba de ser un mero punto en el cielo nocturno. Ahora se nos aparece como una tierra de volcanes empinados, de lechos fluviales secos, de antiguos lagos y de llanuras de lava barridas por el viento. Marte cuenta con una de las historias más apasionantes del sistema solar, aunque apenas ha comenzado a bosquejarse. Llevamos años debatiendo en torno a cuestiones fundamentales: si el planeta fue cálido y húmedo, parecido a la Tierra, o si fue frío, seco y árido, a la manera lunar, como si pudiéramos reducir la historia de un mundo entero a media docena de palabras.



1. AMANECER SOBRE ARABIA TERRA apuntando hacia el este, hacia Utopia Planitia. Esta reconstrucción artística de las imágenes espaciales muestra los márgenes de Vastitas Borealis, una inmensa llanura donde las aguas de riada de los antiguos canales podrían haber quedado estancadas. Hacia el centro de la ilustración, los primeros rayos solares rozan el borde occidental del cráter Lyot.

RON MILLER





En el último decenio entramos en la tercera era de la exploración marciana. La primera se produjo en el siglo XIX, con las observaciones telescópicas del planeta. En la segunda, que abarcó los años sesenta y setenta del siglo XX, se acercaron a él naves espaciales. Las misiones en órbita y sobre el terreno han detallado su topografía, determinado su mineralogía y fotografiado la superficie con precisión suficiente para interpretar procesos geológicos. Por último, se han conjugado los datos obtenidos en órbita con los tomados por los robots. Marte, ahora, puede investigarse con los recursos propios de la ciencia geológica: valiéndose de rocas, minerales y morfología de la superficie para tejer la historia del astro.

El planeta ha experimentado una diversidad sorprendente de procesos y condiciones a lo largo del tiempo. Ha abrigado desde entornos resecos hasta otros enterrados bajo hielo y nieve, pasando por espacios rebosantes de humedad. No sirven las etiquetas simplificadoras. Lejos de inquirir si fue "cálido" o "frío", las preguntas a formular son ahora las siguientes: ¿hasta qué punto fue cálido? ¿Cuánta humedad tuvo? ¿Durante cuánto tiempo? ¿Dónde? Las respuestas que van configurándose afectan a la incógnita que a muchos nos ha impulsado a estudiar el planeta rojo: su potencial para albergar vida, en el presente o en el pasado.

Resumen/Las singularidades de Marte

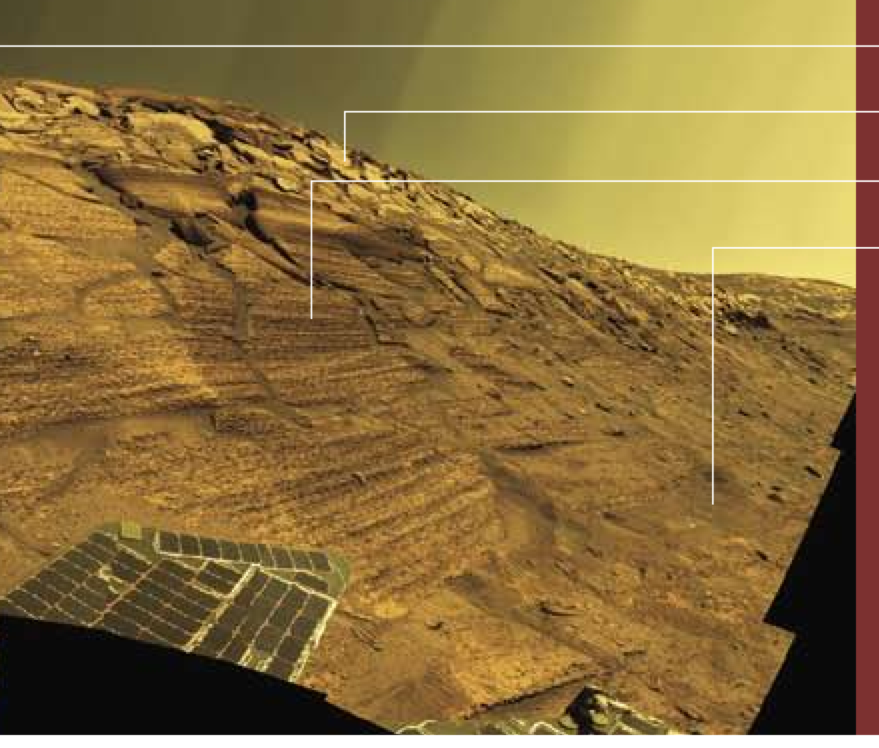
- Los vehículos *Spirit* y *Opportunity* han recorrido zonas de Marte durante un año y medio, mientras tres naves espaciales registraban desde sus órbitas la topografía y composición química del planeta con una precisión sólo conocida hasta entonces en la Tierra.
- Hasta estas misiones, la prueba principal de la existencia de agua líquida en el pasado de Marte era de naturaleza morfológica: los accidentes del suelo, muy sugerentes, pero también muy ambiguos. Ahora, los mejores indicios son mineralógicos (la presencia de óxidos de hierro y de sulfatos) y relativos a texturas (esférulas y ondulaciones y de los lechos rocosos); confirman sin ambages que *Opportunity* se posó sobre el fondo de un antiguo lago.
- La historia geológica del planeta ha ido experimentando cambios radicales y extraños, de un lugar a otro y a lo largo del tiempo. Gran parte del planeta no ha visto nunca una gota de agua; el mismo punto de aterrizaje del *Opportunity* ha conocido larguísimas sequías. También sorprende la diversidad de volcanes y otras estructuras geológicas.

Dos lugares, dos visiones

En el marco de un programa de la NASA, en enero de 2004 tomaron suelo, en sendos puntos de Marte, dos de las máquinas más complejas jamás construidas. Equipadas con cámaras y espectrómetros que determinarían la composición del suelo y de las rocas, los robots *Spirit* y *Opportunity* habían emprendido el viaje para dar respuesta a la cuestión central de la geología marciana: ¿cuál ha sido allí el papel del agua? El *Spirit* se posó sobre el cráter Gusev, elegido por su relieve: las imágenes tomadas en órbita revelaban la formación de un valle, el Ma'adim, en el cráter; exactamente, como si Gusev hubiera sido un lago.

En un comienzo el lugar resultó decepcionante. El *Spirit* no halló signos de la presencia anterior de agua. Sí mostró rocas volcánicas compuestas, según los espectrómetros, por olivino y piroxeno, minerales muy sensibles incluso a la más mínima gota de agua líquida. Estas rocas no han estado expuestas a cantidad alguna de agua en los tres mil millones de años transcurridos desde que las erupciones las arrojaron al exterior.

Mas, cuando el *Spirit* subió por las colinas Columbia, desde donde se avista el punto de aterrizaje, la situación se tornó interesante. Descubrió allí grandes cantidades de sales de azufre. Era evidente que las rocas volcánicas se rompieron en pequeños granos que la sal cementó después; este proceso pudo haber estado asociado a una infiltración de agua líquida dentro de las rocas o a la presencia de



2. EL TERRAPLEN BURNS es un afloramiento rocoso espectacular, de la altura de un edificio de tres plantas, que el robot *Opportunity* ha explorado con detalle. Forma parte del borde del cráter Endurance, a unos 700 metros de donde se posó el vehículo. Las rocas de la cresta, al igual que las del punto de aterrizaje, son ricas en sulfatos (*rojo y amarillo en la imagen interior de falso color*). Debieron de depositarse a lo largo de repetidas inundaciones y desecaciones de la zona. Más abajo hay capas finas de una mezcla (*verde*) de hematites, mineral relacionado con el agua, y de minerales basálticos hidrófobos. Se trata, al parecer, de antiguas dunas de arena, por lo general muy secas pese a que se hallaban cerca de un gran embalse de agua. El fondo del cráter está cubierto de arena basáltica (*azul*).

NASA/JPL/CORNELL

ácido sulfúrico que reaccionase con los minerales de la roca. A pesar de este indicio de agua, las rocas siguen conteniendo cantidades importantes de olivino y piroxeno. No obstante, pues, el parecido del lugar con el lecho de un lago, el agua habría desempeñado un papel menor en los últimos miles de millones años.

El robot *Opportunity* se dirigió a las llanuras Meridiani. La elección del destino señaló una nueva etapa en nuestra exploración del sistema solar: se trataba de la primera vez que se enviaba una sonda a un punto escogido en razón de su mineralogía. Las primeras misiones espaciales a Marte estudiaron los elementos químicos de que estaba compuesta la superficie, pero la identificación de los minerales —los compuestos y estructuras cristalinas formados por esos elementos— requería un espectrómetro de emisión térmica, instrumento que había desarrollado la nave "Mars Global Surveyor" de la NASA. (Esta sonda alcanzó el planeta en 1997.) En los mapas mineralógicos que confeccionamos, Meridiani sobresalía por su notable concentración de hematites cristalinas.

Este óxido de hierro, común en la Tierra, se forma a través de varios procesos, la mayoría de los cuales requieren agua. Así, por precipitación de fluidos que circulan por los sedimentos; también, por deposición y deshidratación de minerales de hierro que contengan agua, como la goethita, mineral pardorrojizo que se halla en suelos desérticos. Las rocas de Meridiani ricas en hematites presentan una fina estratificación y se erosionan con facilidad; se asientan sobre la superficie más vieja y salpicada de cráteres, que nos emite a un depósito sedimentario. Las hematites, además, rellenaron unos canales preexistentes y otras zonas bajas de la topografía; ello da a entender que estas rocas fueron depositadas por el agua y no tapizaron el paisaje como ceniza volcánica o polvo arrastrado por el viento.

A los pocos días del aterrizaje, el *Opportunity* confirmó que Meridiani estuvo bajo el agua alguna vez. Enseguida avistó afloramientos de rocas sedimentarias estratificadas, los primeros observados en Marte. Las rocas contienen tanto sulfato —del 30 al 40 por ciento de su peso—, que sólo la evaporación de agua rica en azufre puede explicarlo. Los sulfatos no son, ni mucho menos, tan abundantes en Gusev. Las hematites adoptaron la forma de esferas (apodadas "arándanos") de uno a cinco milímetros de diámetro, incrustadas en las capas rocosas o dispersas por el suelo.

El mayor de los afloramientos investigados por el *Opportunity*, el terraplén Burns, se manifiesta como una secuencia de dunas de arena que hubieran recibido agua de la superficie o del subsuelo. Muchos de los granos de esas dunas conservadas son sulfatos procedentes de la evaporación de agua estancada, quizás en las "playas", espacios llanos entre dunas. Si tomamos por punto de referencia lo que sucede en la Tierra, la formación de las rocas del terraplén Burns se desarrolló a lo largo de miles o cientos de miles de años. Los granos esféricos de hematites podrían haberse creado más tarde, en fluidos ricos en hierro que circulasen a través de los sedimentos. Por primera vez, se investigó en Marte un afloramiento con el mismo enfoque pluridisciplinar que el aplicado en la Tierra.

La morfología de las llanuras Meridiani, uno de los paisajes más planos que se hayan visto en los planetas, se asemeja a la del lecho de un lago. La extensión de las hematites cartografiada por los instrumentos en órbita revela que se trató de un gran lago aislado o de un mar pequeño, pero no de una parte de un océano global. Algunos de los cráteres al sur y al oeste del depósito principal de hematites contienen también rocas más ricas en ese mineral. Quizá fueron lagos independientes.

En resumen, diríase que los robots hubiesen alcanzado planetas diferentes. Uno, más seco que cualquier desierto terrestre; otro, un mundo de mil lagos. ¿Son éstas las únicas posibilidades? ¿Ofrece mayor diversidad la geología marciana? Estos dos parajes, distantes entre sí miles de kilómetros, ¿representan todas las posibles composiciones rocosas y actividades acuosas de Marte? Para abordar tales cuestiones, se ha empezado por someter a nuevo análisis los datos tomados en órbita.

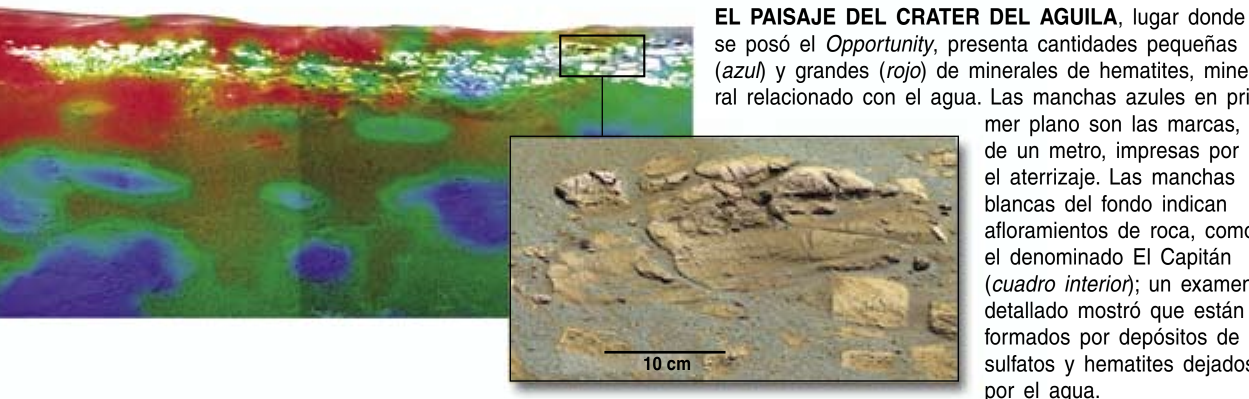
Un mundo de lava

A lo largo de los últimos ocho años, el espectrómetro de emisión térmica ha descubierto que las rocas y la arena marcianas están formadas, casi enteramente, por minerales de origen volcánico: feldespato, piroxeno y olivino, los componentes del basalto. En la primavera de 2004 la nave *Mars Express,* de la Agencia Espacial Europea, a bordo de la cual se encuentra el espectrómetro del infrarrojo cercano OMEGA, se sumó a nuestro trabajo y comprobó la extensa presencia de estos minerales. El olivino se halla expuesto, más de 4,5 kilómetros por debajo de la superficie, en las paredes del cañón Valles Marineris; se encuentra en todas las llanuras ecuatoriales, incluido el fondo de los canales.

No nos sorprendió, por supuesto, la presencia de basalto. Recubre éste gran parte de la Tierra y de la Luna. La lava que rezuma en Hawai es basalto. El basalto constituye un tipo primigenio de lava —procedente de la primera fase de fusión del manto del planeta— que, en la Tierra, mana sin cesar de las cordilleras mesooceánicas y crea el suelo marino.

Sí resultó inesperado, en cambio, otro descubrimiento. Las rocas de los terrenos más antiguos y salpìcados de cráteres eran basálticas, pero las rocas jóvenes de las

EL MARTE HUMEDO

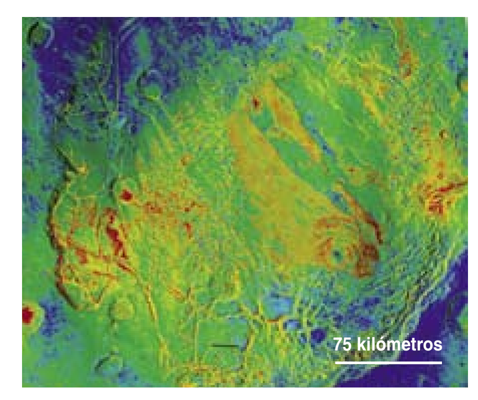


EL PAISAJE DEL CRATER DEL AGUILA, lugar donde se posó el *Opportunity*, presenta cantidades pequeñas (*azul*) y grandes (*rojo*) de minerales de hematites, mineral relacionado con el agua. Las manchas azules en primer plano son las marcas, de un metro, impresas por el aterrizaje. Las manchas blancas del fondo indican afloramientos de roca, como el denominado El Capitán (*cuadro interior*); un examen detallado mostró que están formados por depósitos de sulfatos y hematites dejados por el agua.

LOS “ARANDANOS” son esférulas dispersas por el área de aterrizaje. Su alta concentración en esta roca, llamada Berry Bowl (*mostrada en falso color*), permitió al robot determinar su composición: se trata de hematites, que debió de precipitar del agua contenida en los poros de los sedimentos del lecho lacustre.

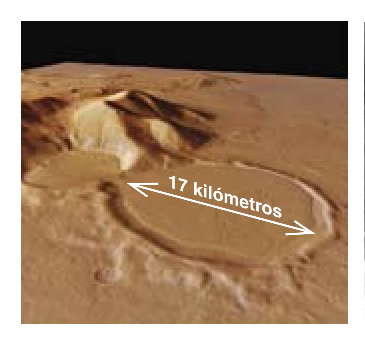


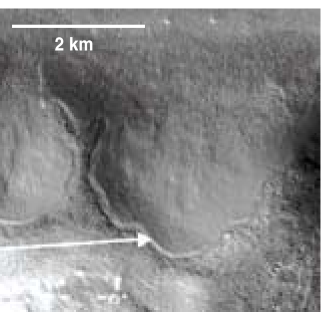
LAS IMAGENES MICROSCOPICAS muestran esférulas en el suelo (*izquierda*) e incrustadas en una roca a la que se ha llamado Upper Dells (*arriba*). La roca presenta trazas de unos milímetros de espesor cuya forma prueba que se sedimentó en un curso de agua.

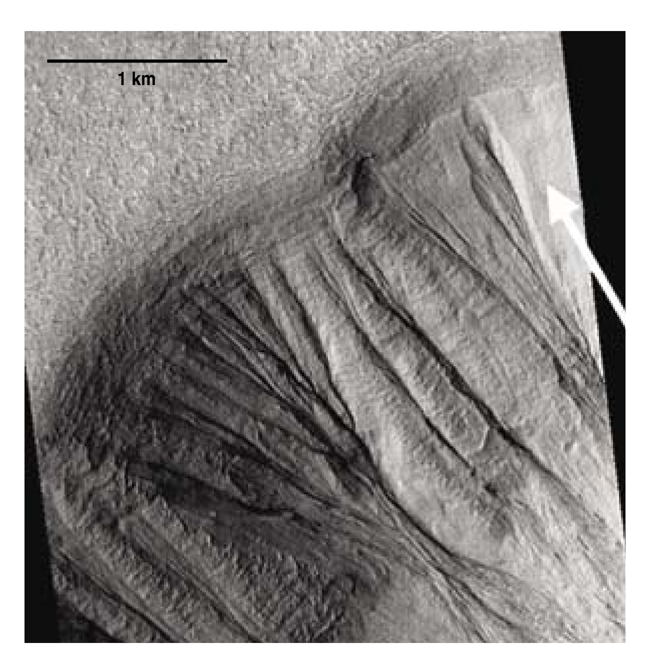


ARAM CHAOS es un cráter repleto de hematites, al igual que la zona del *Opportunity*. Las temperaturas nocturnas medidas por la nave *Mars Odyssey* dan idea de la consistencia del material: la roca está más caliente (*rojo*) y el polvo y la arena más fríos (*azul*). Las rocas planas del centro del cráter (*naranja*) parecen sedimentos de un lago. El terreno fracturado que hay hacia el sur da a entender que hubo un desplome súbito del suelo, quizá por haber brotado agua subterránea.

NASA/JPL/CORNELL/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA (*paisaje del cráter del Aguila*); NASA/JPL/CORNELL (*El Capitán y Berry Bowl*); NASA/JPL/CORNELL/USGS (*imagen microscópica de las esférulas del suelo y de las incrustadas*); NASA/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA/TIM GLOTCH (*Aram Chaos*)







3. NIEVE. Marte, aunque sigue activo, no parece ahora tan dinámico como en el pasado. La nave *Mars Express* fotografió en cráteres y cordilleras estructuras que parecen glaciares, jóvenes desde un punto de vista geológico (*izquierda*). La nave *Mars Express* detectó depósitos de nieve (*flechas, centro y derecha*) en las pendientes que miran a los polos. La nieve podría ser la fuente del agua de ramblas recientes (*derecha*). Si hoy sobrevivieran microorganismos en Marte, sería en esas acumulaciones de nieve.

ESA/DLR/UNIVERSIDAD LIBRE DE BERLIN (G. NEUKUM) (*izquierda*); NASA/JPL/SISTEMAS DE CIENCIA ESPACIAL MALIN (*centro*); NASA/JPL/SISTEMAS DE CIENCIA ESPACIAL MALIN/PHILIP CHRISTENSEN (*derecha*)

tierras bajas septentrionales se asemejaban a un tipo de lava evolucionada, la andesita: contenían más vidrio, más minerales ricos en sílice y menos minerales de hierro. En la Tierra, se forman andesitas cuando las placas tectónicas subducentes mezclan agua con las rocas fundidas del subsuelo.

La existencia de andesitas en Marte resulta fascinante. Podría indicar que el manto marciano es más húmedo que el terrestre o que las lavas más jóvenes se fundieron a temperaturas y presiones diferentes de las típicas de basaltos más antiguos. Algunos sugieren que las supuestas andesitas son basaltos camuflados; una neblina de agua o de ácido podría haber reaccionado con los minerales para crear un recubrimiento parecido a la andesita. Quizá tengamos que esperar a una investigación más fina de la superficie para resolver la cuestión.

El espectrómetro de emisión térmica tiene una resolución espacial bastante pobre: un píxel abarca varios kilómetros. Empezó a tomarse conciencia de la diversidad mineralógica de Marte en el año 2001, cuando THEMIS, una cámara infrarroja que mi grupo construyó para otra misión de NASA, la *Mars Odyssey*, inició la cartografía del planeta con una resolución de 100 metros. La cámara y OMEGA han revelado una composición variable en las rocas ígneas que rivaliza con la conocida de esas mismas rocas en la Tierra.

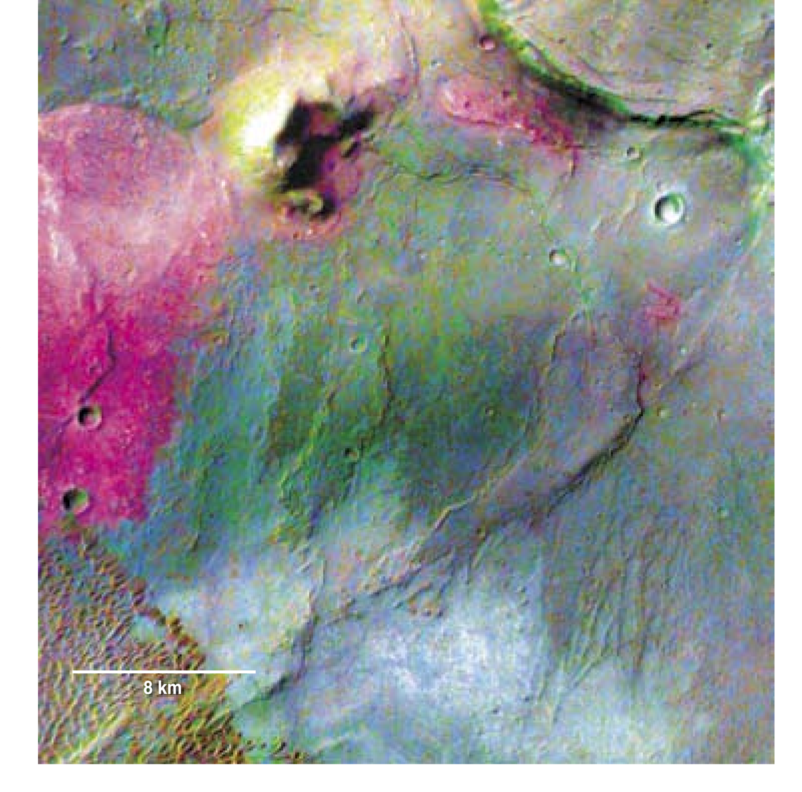
Cerca del ecuador marciano existe un volcán de 1100 kilómetros de diámetro, Syrtis Major, cuya cima presenta una serie de calderas, cráteres formados por el derrumbe de bóvedas volcánicas. La mayor parte del volcán es basáltico, pero las laderas están manchadas con conos y flujos de una lava vítrea, rica en sílice, la dacita. Esta clase de rocas se origina en las cámaras de magma que hay bajo los volcanes. A medida que el magma se enfría, cristalizan los primeros minerales, como el olivino y el piroxeno, ricos en hierro y magnesio. Esos minerales se depositan en el fondo de la cámara y, con ello, el resto del magma se enriquece en sílice y aluminio: de ahí surgen las dacitas. Los picos centrales de varios cráteres de los flancos de Syrtis Major están compuestos de rocas aún más ricas en sílice y granito; podrían haberse formado mediante una separación extrema del cristal o mediante el derretimiento, a gran escala, de basaltos más antiguos.

Se ha llegado a la conclusión de que este volcán ha experimentado varias fases de desarrollo. La lava basáltica manó del centro y creó el volcán. Cuando evolucionó la química del magma, se retiró de la cámara subyacente a la cima, lo que produjo el hundimiento del suelo; el magma dio entonces lugar a erupciones por los flancos. Los volcanes de Marte no sólo son gigantescos; presentan además una sorprendente complejidad.

Débiles lluvias

Tan importante es lo que tiene Marte como lo que no tiene. El cuarzo, común en la Tierra, es rarísimo en Marte, lo que apunta a que escasea el granito, del que procede. Tampoco hay indicios de minerales metamórficos, como la pizarra o el mármol, que se producen cuando las rocas volcánicas o sedimentarias sufren presiones o temperaturas muy elevadas. De ello se infiere que Marte carece de una tectónica capaz de subducir rocas hacia grandes profundidades (donde quedarían sujetas al calor y la presión) y de traerlas de nuevo a la superficie.

La Tierra cuenta con depósitos inmensos de rocas carbonatadas (caliza, por ejemplo), precipitados de océanos cálidos y ricos en dióxido de carbono. Los expertos en geología planetaria pensaron que habría también capas gruesas de carbonatos en Marte, pues le atribuían un pasado cálido y húmedo. No se ha encontrado ninguna. Lo que entraña diversas posibilidades: los océanos estaban fríos, existieron por poco tiempo, los cubría el hielo o se dio cualquier otra situación hostil para los carbonatos. El ubicuo polvo contiene carbonatos en pequeña cuantía, pero es probable que se formaran por interacción directa con el vapor de agua de la atmósfera, no por reacción con el agua líquida de la superficie. Otra clase de minerales relacionados con el agua, las arcillas, también es rara en Marte, lo que de nuevo apunta a que el planeta ha estado casi siempre seco. Todo ello concuerda con la abundancia de olivinos y piroxenos.



4. NILI PATERA, una zona de la cumbre del volcán gigante Syrtis Major, contiene lavas basálticas antiguas (*azul*) y conos y flujos de dacita más jóvenes (*rojo*). Las dunas de arena (*naranja*) mezclan ambos tipos de materiales. La química del volcanismo marciano es más compleja de lo que se esperaba.

NASA/ASU/NOEL GORELICK

En este sentido, lo que el *Spirit* encontró en el cráter Gusev es más representativo de Marte que lo que *Opportunity* halló en Meridiani. Con todo, Meridiani no es el único sitio donde aparecen lagos en las imágenes orbitales. El cráter Aram Chaos, de 280 kilómetros de diámetro, presenta un canal de flujo y está relleno de rocas estratificadas que contienen hematites. Hay bloques gigantescos de piedras esparcidos por el suelo del cráter. Parece como si un torrente de agua subterránea hubiera manado catastróficamente y se hubiera hundido el terreno suprayacente. Parte del agua se estancó en el cráter, formando las capas de sedimentos con hematites.

De manera similar, las gargantas de Valles Marineris presentan rocas con hematites. Mas aquí las rocas se hallan dispuestas en capas finas de fácil erosión, parecidas a lo que se esperaría de la sedimentación en agua estancada. Estas rocas, y otras a lo largo de la región ecuatorial, son ricas en sulfatos, signo de sedimentos depositados por el agua. Los lagos han podido experimentar numerosos episodios de inundación, evaporación y desecación, posiblemente también de congelación. Además de estos lechos antiguos, existen regiones roturadas por densas redes de canales que parecen creadas por lluvias y escorrentías de superficie. Algunos sostienen que Marte tuvo océanos extensos: las imágenes y los datos topográficos sugieren costas y suaves fondos marinos.

Juntos, estos descubrimientos constituyen una prueba sólida de que hubo agua estancada en determinadas regiones durante breves períodos de tiempo. ¿Qué factores causaron que el agua se acumulara y permaneciera estable en esos lugares? Un primer razonamiento apunta a una combinación de calor geotérmico, grandes dosis de sal (que rebajan la temperatura de congelación) y una capa protectora de hielo. Los impactos de meteoritos podrían haber calentado la atmósfera y aumentado su densidad ocasionalmente.

Pero ya no puede mantenerse que Marte se pareció a la Tierra. Del registro mineralógico global se extrae la impresión de que la superficie marciana es vieja, con unos minerales volcánicos originales que todavía se conservan y a los que el agua apenas si ha alterado. En Meridiani, las arenas basálticas yacen sobre los sedimentos del lago: ese lugar ha permanecido seco desde hace dos o tres mil millones de años. Hay lagos y "redes fluviales", pero el agua debió de fluir por ellas muy brevemente. Es posible que el agua estuviese congelada la mayor parte del tiempo y fluyera en ocasiones para congelarse de nuevo enseguida. Los científicos planetarios se muestran perplejos ante un mundo tan árido en general y, sin embargo, capaz de mostrar tanta agua en determinados sitios y momentos.

El planeta de las largas estaciones

El pasado épico de Marte atrae nuestra atención, pero dos novedades nos inclinan ahora a estudiar su actividad actual. La primera es el consenso creciente en torno a un planeta geológicamente activo en un pasado reciente. La mayoría de los grandes volcanes y las llanuras de lava son viejos y datan de la primera mitad de la historia del planeta, pero la ausencia de cráteres de impacto de meteoritos en los flujos de lava de algunas regiones, como Athabasca, resaltan la juventud de éstos (según el patrón geológico): habrían manado de erupciones acontecidas durante los últimos millones de años. Se han buscado volcanes activos y puntos calientes geotérmicos en las imágenes infrarrojas nocturnas, sin éxito. Marte se ha enfriado hasta tal grado, que apenas desarrolla actividad volcánica, por más que de vez en cuando aflore lava en superficie.

La segunda novedad concierne al descubrimiento de reservas colosales de agua helada, que se desplazan por el planeta con el cambio de clima. Los dos polos presentan depósitos de hielo o de sedimentos ricos en hielo con kilómetros de espesor; la suma de ambas cubiertas heladas equivale a una extensión mayor que España. Las mediciones de temperatura realizadas en los años setenta demostraron que el casquete polar septentrional es agua helada, pero no determinaron la composición del casquete polar meridional. La temperatura superficial corresponde a la del hielo de dióxido de carbono; pero, ¿podría haber agua helada debajo? Las tomas de la temperatura más recientes de THEMIS han detectado agua helada que aflora en algunas zonas; la respuesta parece, pues, afirmativa.

Al inventario de agua conocido hay que sumar el hielo subterráneo detectado por el Espectrómetro de Rayos Gamma y por el Detector de Neutrones de Alta Energía. Estos instrumentos, ambos a bordo de *Mars Odyssey,* miden los rayos gamma y los neutrones que se generan cuando los rayos cósmicos chocan contra el suelo. La distribución de energía de los fotones gamma y de los neutrones revela la composición del suelo hasta profundidades de varios metros. Así, el hidrógeno absorbe con facilidad los neutrones; por tanto, una merma neutrónica



5. APOLLINARIS PATERA, un volcán extenso, aunque somero, escupió lavas de diversa composición. Podría ser la fuente de la ceniza encontrada por el robot *Spirit* unos 350 kilómetros al sur. El agua ha tallado profundamente los depósitos del volcán. Desde el espacio se han observado corrimientos de tierras en la zona.

NASA/ASU/NOEL GORELICK

denunciará la presencia de hidrógeno en el subsuelo, sobre todo en las formas de H_2 y agua. En las regiones comprendidas entre los 60 grados de latitud y los polos, el agua representa hasta un 50 % de la composición del terreno. Tamaña concentración no puede atribuirse a una simple difusión del vapor de agua atmosférico en los poros del suelo. Antes bien, el hielo tuvo que depositarse en forma de nieve o de escarcha.

Las inusuales formaciones del paisaje marciano a latitudes medias indican también la presencia de hielo. En ambos hemisferios, entre los 30 y 50 grados de latitud, se observan suelos con una textura que recuerda a una cancha de baloncesto. Esa textura podría deberse a un calentamiento del suelo que evapore el hielo, con el consiguiente resquebrajamiento del terreno. Hay una segunda clase de depósitos, con espesores de hasta 10 metros, en las oquedades de pendientes frías que miran hacia los polos; quizá se trate de un remanente de nieve de agua casi pura. Particular interés ha revestido el hallazgo de ramblas en latitudes medias; pudieron crearlas el agua de primavera, la fusión de agua limítrofe con la superficie o el derretimiento ascendente de nieve acumulada.

Todos estos accidentes relacionados con el agua sugieren que Marte, lo mismo que la Tierra, atraviesa ciclos de edades glaciales. La inclinación del eje de rotación de Marte oscila unos 20 grados a lo largo de un período de 125.000 años. Si la inclinación es suave, los polos se convierten en los lugares más fríos del planeta. Cae más nieve de la que se evapora, por lo que se produce una acumulación neta de hielo. A medida que la inclinación aumenta, los polos reciben más luz solar y se calientan a expensas de las latitudes medias. El agua tiende a desplazarse de los polos hacia el ecuador. Al irse acumulando nieve en la superficie, puede empezar a haber alguna escorrentía. Hoy día, las latitudes medias están calentándose y el recubrimiento de nieve ha desaparecido casi por completo. Si el modelo de los ciclos glaciales es correcto, la glaciación regresará dentro de unos 25.000 o 50.000 años.

La historia de la ciencia de Marte recuerda a la fábula de los ciegos que quieren describir un elefante: la geología cambia en razón del lugar donde se mire. El planeta, muy rico en texturas, vive un presente asombrosamente dinámico y ha tenido un pasado intrincado e incluso paradójico. La diversidad de sus rocas volcánicas no desmerece de la observada en la Tierra. Varían muchísimo las manifestaciones de agua. El planeta experimentó grandes inundaciones, e incluso lluvias, en épocas tempranas de su historia; pese a lo cual, las rocas más antiguas contienen todavía minerales que se descomponen en un entorno húmedo. El clima es seco y frío; no obstante, el vehículo *Opportunity* se topó con el fondo de un antiguo mar, señal de que el clima fue muy distinto. El agua líquida es inestable en las condiciones actuales, lo que no ha sido óbice para la formación reciente de ramblas y barrancos, que podrían seguir produciéndose.

En la diversidad de componentes del relieve, de una región a otra y de una época a otra, se encierra uno de los indicadores más esperanzadores de una biología marciana: proporcionan un rico conjunto de entornos donde la vida podría haber surgido. El agua abundó en los lagos durante períodos largos, aunque intermitentes. Podría haber perdurado un tiempo suficiente para que cobrara vida la materia inerte. Los organismos quizá se aferrasen a la vida hibernando durante las épocas frías y descongelándose al mejorar las condiciones climáticas. Los remanentes de nieve, los barrancos y otros parajes de ese tenor son los puntos ideales para que las misiones robóticas del futuro busquen pruebas de vida.

El autor

Philip R. Christensen, autoridad mundial en la composición de la superficie de Marte, es profesor de la Universidad de Arizona en Tempe.

Bibliografía complementaria

GLOBAL MAPPING OF MARTIAN HEMATITE MINERAL DEPOSITS: REMNANTS OF WATER-DRIVEN PROCESSES ON EARLY MARS. P. R. Christensen, R. V. Morris, M. D. Lane, J. L. Bandfield y M. C. Malin en *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, parte 10, págs. 23.873-23.885; 2001.

MORPHOLOGY AND COMPOSITION OF THE SURFACE OF MARS: MARS ODYSSEY THEMIS RESULTS. Philip R. Christensen et al. en *Science*, vol. 300, n.º 5628, págs. 2056-2061; 27 de junio, 2003.

SPIRIT AT GUSEV CRATER. Número especial de *Science*, vol. 305, n.º 5685, págs. 793-845; 6 de agosto, 2004.

OPPORTUNITY AT MERIDIAN PLANUM. Número especial de *Science*, vol. 306, n.º 5702, págs. 1697-1756; 3 de diciembre, 2004.

ROVING MARS: SPIRIT, OPPORTUNITY, AND THE EXPLORATION OF THE RED PLANET. Steve Squyres. Hyperion, 2005.



1. ENTRE LA MASA DE ELEFANTE AFRICANO MACHO (cerca de 6000 kilogramos) y la de la especie más pequeña de hormiga (0,01 miligramos) hay más de once órdenes de magnitud de diferencia, la misma aproximadamente que entre el quark cima y el neutrino. Sigue ignorándose por qué las masas de las partículas elementales difieren en una cantidad tan grande.

Los misterios de la MASA



Se está buscando una partícula esquiva, que revelaría la presencia de un campo que impregna toda la realidad. Si encontráramos este campo de Higgs, conoceríamos mejor la naturaleza del universo

Gordon Kane

Muchos creen que saben qué es la masa, pero entienden sólo una parte de la historia. Está claro que un elefante abulta y pesa más que una hormiga. Incluso en ausencia de la gravedad, tendría mayor masa y costaría más empujarlo y ponerlo en movimiento. Su masa es mayor porque consta de muchos más átomos que la hormiga. Pero, ¿qué determina las masas de cada átomo? ¿Y de las partículas elementales que constituyen los átomos? Más aún: ¿por qué tienen masa?

El problema de la masa consta, pues, de dos caras: el origen de la masa y la especificidad de la masa de cada partícula. La originan, por lo menos, tres mecanismos diversos, que describiré más adelante. A una nueva clase de campo, que impregna la realidad entera, le corresponde un papel clave en las teorías provisionales sobre la masa: el campo de Higgs. Según se cree, las masas de las partículas elementales se deben a la interacción con el campo de Higgs. Si existe, la teoría exige que tenga una partícula asociada, el bosón de Higgs. Se la está buscando ahora con los aceleradores.

La otra cara del problema de la masa consiste en saber por qué las diversas especies de partículas elementales tienen sus cantidades específicas de masa. Esas masas intrínsecas abarcan por lo menos once órdenes de magnitud, pero todavía no sabemos la razón de ello. Para comprender la magnitud de esa disparidad, adviértase que la masa de un elefante y la de la más pequeña de las hormigas difieren también en unos once órdenes de magnitud.

¿Qué es la masa?

Isaac Newton presentó una primera definición científica de la masa en 1687 en los *Principia*: "La cantidad de materia es la medida de la misma que nace de su densidad y su volumen conjuntamente". Esa definición, muy elemental, les bastó a Newton y a todos los científicos durante más de 200 años. Entendían que la ciencia debe proceder primero a describir qué sucede y sólo más adelante ha de entender por qué. En años recientes, sin embargo, el *porqué* de la masa se ha convertido en asunto que la física ha de investigar. Conocer el significado y los orígenes de la masa completará y extenderá el modelo estándar de la física de partículas, la bien asentada teoría que describe las partículas elementales conocidas y sus interacciones. Resolverá también el misterio de la materia oscura, que constituye cerca de una cuarta parte del universo.

La concepción moderna de la masa es mucho más intrincada que la definición de Newton. Se basa en el modelo estándar. La parte esencial del modelo estándar es una función matemática, un "lagrangiano", que representa las interacciones entre las partículas. Con esa función, siguiendo las reglas de la teoría cuántica relativista, se puede calcular el comportamiento de las partículas elementales, incluida su unión para formar partículas compuestas, entre ellas los protones y los neutrones. Lo mismo para las partículas elementales que para las compuestas, podremos calcular su comportamiento cuando experimentan fuerzas. Para una fuerza F podremos escribir la ecuación de Newton $F = ma$, que relaciona la fuerza, la masa y la aceleración resultante. El lagrangiano nos indica qué hay que utilizar por m en la ecuación; eso es lo que se quiere

BRYAN CHRISTIE DESIGN

significar con la expresión “masa de la partícula”.

Pero la masa, tal como solemos entenderla, no sólo se manifiesta mediante igualdad $F = ma$. Por ejemplo, la teoría especial de la relatividad de Einstein predice que las partículas sin masa viajan en el vacío a la velocidad de la luz y que las partículas con masa se mueven siempre más despacio, de una manera que se podrá calcular si conocemos sus masas. Las leyes de la gravedad predicen, con precisión, que la gravedad actúa sobre la masa, y también sobre la energía. La cantidad m deducida del lagrangiano de cada partícula cumple esas condiciones, conforme se espera de una masa.

Las partículas fundamentales tienen una masa intrínseca: su masa en reposo (de las que tienen masa en reposo nula se dice que son partículas sin masa). A la masa total de una partícula compuesta contribuyen la masa en reposo de sus componentes y la energía cinética de su movimiento y la energía potencial de sus interacciones. La energía y la masa están relacionadas, según dicta la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$ (la energía es igual a la masa por la velocidad de la luz al cuadrado).

Un ejemplo de energía que contribuye a la masa ocurre en la clase de materia que más familiar nos es: en los protones y los neutrones que forman las estrellas, los planetas, y todo cuanto vemos, incluido nosotros mismos. Estas partículas constituyen el 4 o 5 por ciento de la masa del universo. De acuerdo con el modelo estándar, protones y neutrones se componen de quarks, partículas elementales que se unen gracias a otras partículas, éstas sin masa, los gluones. Aunque los constituyentes están moviéndose dentro de cada protón, desde el exterior percibimos el protón como un objeto coherente, con una masa intrínseca que se obtiene agregando las masas y las energías de sus componentes.

El modelo estándar nos permite calcular que casi toda la masa de protones y neutrones se debe a la energía cinética de sus quarks y gluones constituyentes (el resto viene de la masa en reposo de los quarks). Así, cerca del 4 o 5 por ciento del universo entero —casi toda la materia ordinaria que nos rodea—, consiste en la energía del movimiento de quarks y gluones en protones y neutrones.

El mecanismo de Higgs

Al contrario que los protones y los neutrones, las partículas verdaderamente elementales —es el caso de quarks y electrones— no se componen de piezas más pequeñas. En la explicación de sus masas en reposo reside el verdadero núcleo del problema del origen de la masa. Como observé arriba, la física teórica propone que las masas de las partículas fundamentales surgen de las interacciones con el campo de Higgs. Pero, ¿por qué está el campo de Higgs presente por todo el universo? ¿Por qué su intensidad no viene a ser cero a escalas cósmicas, como ocurre con el campo electromagnético? ¿Qué *es* el campo de Higgs?

El campo de Higgs es un campo cuántico. Por misterioso que parezca, no hay partícula elemental que no sea el cuanto de un correspondiente campo cuántico. El campo electromagnético es también un campo cuántico (lo mismo que su partícula elemental, el fotón). A este respecto, el campo de Higgs no es más enigmático que los electrones y la luz. Difiere, sin embargo, de los demás campos cuánticos en tres aspectos cruciales.

La primera diferencia es un tanto técnica. Todos los campos tienen espín, una cantidad intrínseca de momento angular de cada una de sus partículas. Partículas tales como los electrones tienen espín 1/2 y la mayoría de las partículas asociadas a una fuerza, por ejemplo el fotón, tienen espín 1. El bosón de Higgs (la partícula del campo de Higgs) posee espín 0. El tener espín 0 le permite al campo de Higgs aparecer en el lagrangiano de maneras diferentes de cómo lo hacen las demás partículas, lo que a su vez posibilita sus otras dos características distintivas y conduce a ellas.

La segunda característica exclusiva del campo de Higgs explica cómo y por qué tiene intensidad distinta de cero en todo el universo. Cualquier sistema, incluido un universo, caerá en su estado de energía más baja, como una pelota que se precipite al fondo de un valle. Para los campos habituales, los campos electromagnéticos de las emisiones de radio, el estado más bajo de energía es aquel en el que tienen valor cero, en el que se anulan: si el valor de esos campos no es nulo, la energía almacenada en ellos aumentará la energía neta del sistema. Pero en el caso del campo de Higgs, la energía del universo será menor si el campo, en vez de anularse, toma un valor constante distinto de cero. Para los sistemas con campos ordinarios, el fondo del valle corresponde al campo cero; en el caso del Higgs, el valle tiene una colina en el centro (en el campo cero) y la parte más baja del valle forma un círculo alrededor de la colina. El universo, como una pelota, se parará en algún punto de ese foso circular, que corresponde a un valor del campo de Higgs distinto de cero. Es decir, en su estado natural de menor energía, el universo entero está impregnado por un campo de Higgs *distinto de cero*.

La tercera y última propiedad distintiva del campo de Higgs estriba en la naturaleza de sus interacciones con las otras partículas. Las partículas

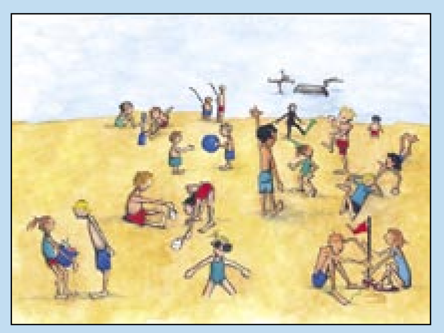
Resumen/Física del campo de Higgs

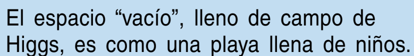
- La masa parece una característica común de la materia, pero constituye todo un misterio para la ciencia. Desde muchos puntos de vista. ¿Cómo adquieren las partículas elementales su masa? ¿Por qué toma los valores concretos que observamos?
- Las respuestas a esas preguntas ayudarán a completar y extender el modelo estándar de la física de partículas, que describe la física que gobierna el universo. El modelo estándar extendido quizás explique en qué consiste la materia oscura invisible, que suma cerca del 25 por ciento del cosmos.
- Según la teoría, las partículas elementales adquieren masa interaccionando con un campo cuántico que impregna toda la realidad. Los experimentos de los aceleradores de partículas podrían obtenerse, pronto, pruebas directas de la existencia de ese campo, el campo de Higgs.

THEO ALLOFS/*American Scientist*

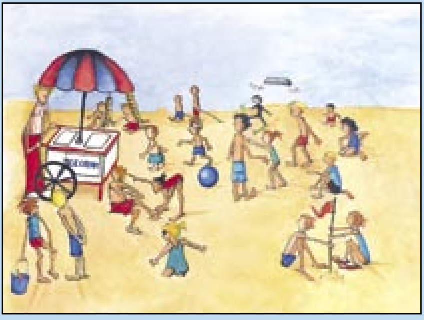
PROPIEDADES DEL BOSON DE HIGGS

ASI GENERA MASA EL CAMPO DE HIGGS

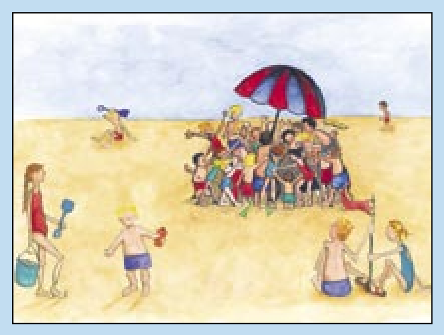




El espacio “vacío”, lleno de campo de Higgs, es como una playa llena de niños.

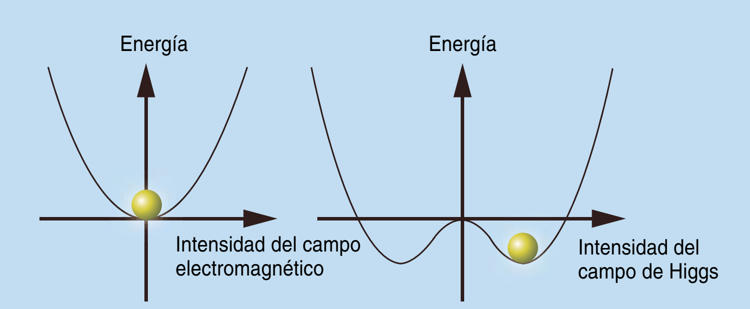


Una partícula que atraviesa ese espacio es como un vendedor de helados que aparece...

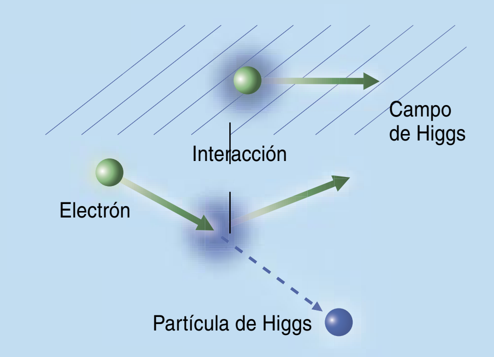


...e interacciona con los niños, que lo frenan, como si adquiriera “masa”.

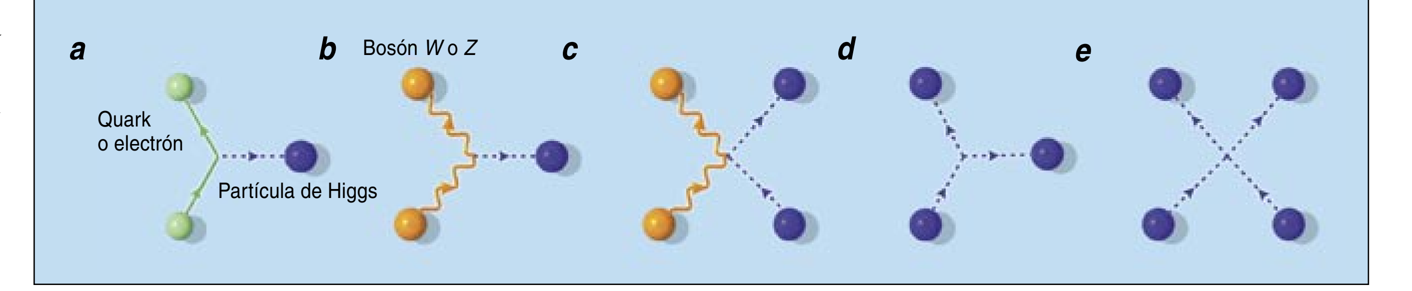
IMPREGNAR LA REALIDAD
Un campo típico, el campo electromagnético por ejemplo, tiene su energía más baja para la intensidad del campo nula (*izquierda*). El universo es como una pelota en movimiento que se detiene en el fondo del valle, es decir, se coloca en el valor cero del campo. El Higgs, por el contrario, tiene su energía mínima en una intensidad del campo distinta de cero, y la “pelota” se para en un valor distinto de cero (*derecha*). Así, el universo, en su estado natural de menor energía, está impregnado por ese valor distinto de cero del campo de Higgs.



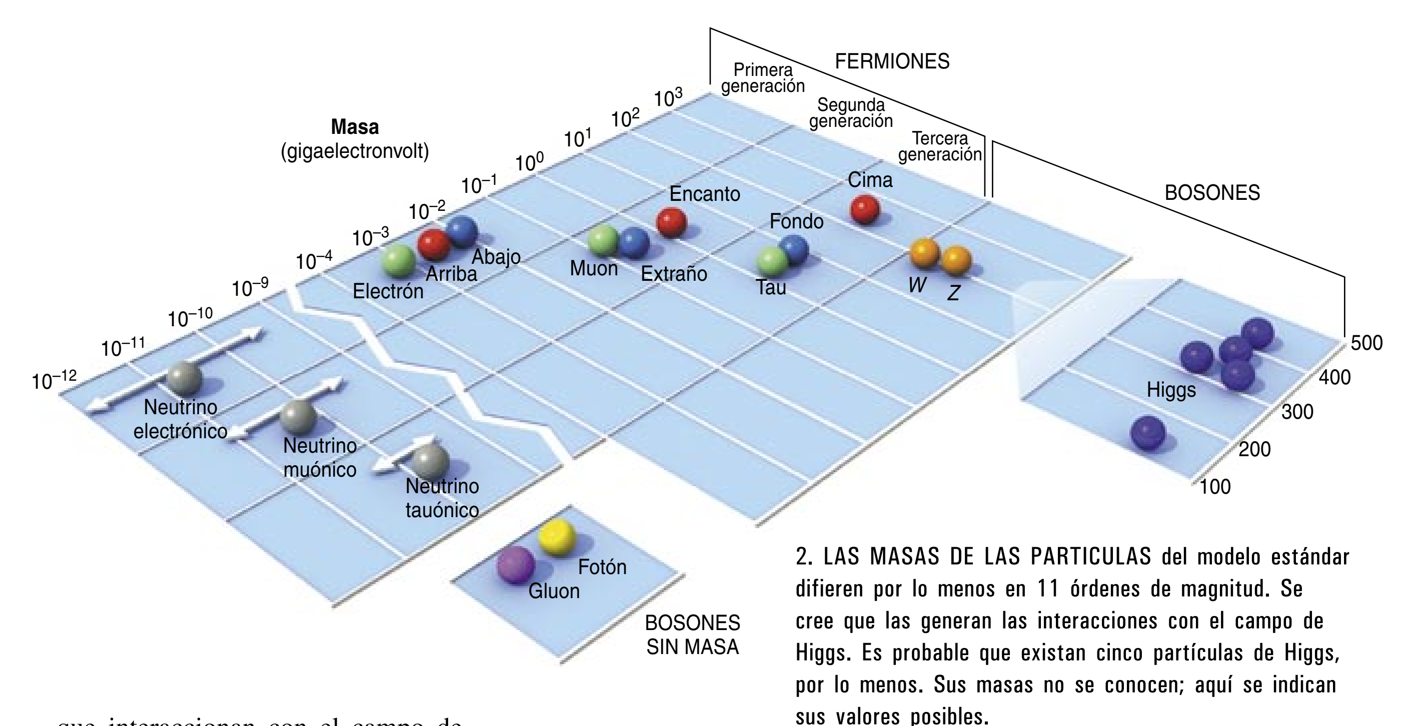
CAUSAR DOS FENOMENOS
Dos fenómenos completamente distintos —la adquisición de masa por una partícula (*arriba*) y la producción de un bosón de Higgs (*abajo*)— son causados por la misma interacción. Este hecho será muy útil para comprobar la teoría de Higgs por los experimentos.



INTERACCION CON OTRAS PARTICULAS
Los “diagramas de Feynman” representan las interacciones de la partícula de Higgs con otras partículas. El diagrama (*a*) representa una partícula —un quark, un electrón— que emite (*figura en la representación)* o absorbe una partícula de Higgs. El diagrama (*b*) muestra el proceso correspondiente a un bosón *W* o *Z*. El *W* y el *Z* pueden también interaccionar simultáneamente con dos Higgs, según se muestra en (*c*), que también representa a un *W* o un *Z* dispersando (es decir, chocando con) una partícula de Higgs. A las interacciones representadas por los diagramas (*a*), (*b*) y (*c*) se debe también la generación de las masas de las partículas. El campo de Higgs también interacciona consigo mismo, según se representa en los diagramas (*d*) y (*e*). Se pueden construir procesos más complicados ensamblando copias de estos diagramas elementales. Las interacciones representadas en (*d*) y (*e*) dan al gráfico de la energía (*arriba a la izquierda*) esa forma.



BRYAN CHRISTIE DESIGN; DIBUJOS (*viñetas superiores*) DE EMILY HARRISON, BASADOS EN UNA IDEA DE DAVID MILLER, *Colegio Universitario de Londres*



2. LAS MASAS DE LAS PARTICULAS del modelo estándar difieren por lo menos en 11 órdenes de magnitud. Se cree que las generan las interacciones con el campo de Higgs. Es probable que existan cinco partículas de Higgs, por lo menos. Sus masas no se conocen; aquí se indican sus valores posibles.

que interaccionan con el campo de Higgs adquieren el comportamiento propio de una partícula dotada de masa; en concreto, una masa proporcional a la intensidad del campo multiplicada por la intensidad de la interacción. Las masas surgen de los términos del lagrangiano que corresponden a la interacción entre las partículas y el campo de Higgs.

Estamos lejos de conocer el tema de un modo cabal. Ignoramos cuántas clases de campos de Higgs hay. Aunque el modelo estándar precisa sólo un campo de Higgs para generar las masas de las partículas elementales, los físicos saben que una teoría más completa debe reemplazar al modelo estándar. Las propuestas más prometedoras son las extensiones supersimétricas del modelo estándar, o modelos estándar supersimétricos. En éstos, cada partícula del modelo estándar tiene una “supercompañera” (hasta ahora no se las ha detectado); las características de una partícula y de su supercompañera guardan estrecha relación. En un modelo estándar supersimétrico se necesitan por lo menos dos clases de campos de Higgs. Las interacciones con ambos campos generan la masa entera requerida por las partículas del modelo estándar. En cambio, generan sólo parte de la masa de las supercompañeras. Los dos campos de Higgs se corresponden con cinco especies de bosones de Higgs: tres eléctricamente neutros y dos, portadores de carga. Las masas de los neutrinos, minúsculas comparadas con las masas de las demás partículas, podrían originarse, aunque de manera bastante indirecta, de estas interacciones o de una tercera clase de campo de Higgs.

Los teóricos esgrimen varias razones para esperar que esta versión de la interacción del Higgs ofrecida por los modelos estándar supersimétricos sea correcta. De entrada, sin el mecanismo de Higgs, los bosones *W* y *Z* que transportan la fuerza débil carecerían, como el fotón (con el que guardan relación), de masa y la interacción débil sería tan intensa como la electromagnética. La teoría sostiene que el mecanismo de Higgs confiere masa al *W* y al *Z* de una manera muy especial. Las predicciones de este enfoque (así el cociente de las masas de *W* y de *Z*) se han confirmado experimentalmente.

En segundo lugar, los demás aspectos del modelo estándar están bien comprobados; en una teoría tan detallada y tan trabada resulta difícil cambiar una parte (el Higgs) sin que repercuta en el resto. Por ejemplo, el análisis de las mediciones precisas de las características de los bosones *W* y *Z* condujo a la predicción exacta de la masa del quark cima antes de que éste apareciese, sin mediación, en un acelerador. Cambiar el mecanismo de Higgs arruinaría esa y otras acertadas predicciones.

En tercer lugar, el mecanismo de Higgs del modelo estándar funciona muy bien al otorgar masa a *todas* las partículas del modelo estándar: bosones *W* y *Z*, quarks y leptones. Las propuestas alternativas no suelen resultar tan satisfactorias. Además, al contrario que otras teorías, el modelo estándar supersimétrico proporciona un marco para unificar nuestro conocimiento de las fuerzas de la naturaleza. Finalmente, el modelo supersimétrico explica por qué el “valle” de energía del universo presenta la forma necesaria que requiere el mecanismo de Higgs. En el modelo estándar básico la forma del valle debe imponerse a modo de postulado, pero en la versión supersimétrica la configuración se deduce matemáticamente.

La prueba de la teoría

La meta de todo físico estriba en realizar experimentos que comprueben de manera directa que la masa surge de las interacciones con los diversos campos de Higgs. Podemos poner a prueba tres características clave. Primero, podemos buscar las señales de los bosones de Higgs. Estos cuantos deben existir; si no, la teoría caería por su base. Se los está buscando en estos momentos en el colisionador Tevatrón, del Laboratorio del Acelerador Nacional Fermi, en Batavia, Illinois.

En segundo lugar, una vez se hayan detectado los bosones de Higgs, podremos observar su interacción con otras partículas. Los mismos términos del lagrangiano que determinan las masas de las partículas fijan también las características de tales interacciones. Podremos, pues, realizar experimentos para analizar

cuantitativamente ese tipo de términos de interacción. La intensidad de la interacción y la cantidad de masa de la partícula están conectadas de manera unívoca.

En tercer lugar, diferentes conjuntos de campos de Higgs, como los que ocurren en el modelo estándar o en sus distintas versiones supersimétricas, suponen diferentes conjuntos de bosones de Higgs con propiedades diversas; por tanto, los experimentos pueden también distinguir entre estas alternativas. Todo lo que necesitamos para realizar las pruebas son colisionadores de partículas apropiados, que alcancen energía suficiente para producir los bosones de Higgs y suficiente intensidad para crearlos en número bastante, así como detectores finísimos para analizar lo que se genere.

La ejecución de tales pruebas se enfrenta, sin embargo, con un problema: todavía no hemos desarrollado las teorías tan bien como para calcular qué masas deben tener los bosones de Higgs. Esta limitación dificulta la búsqueda, porque obliga a examinar un intervalo de masas. Una combinación de razonamientos teóricos y datos experimentales nos guía sobre los valores aproximados que debemos esperar.

El intervalo de masas en que funcionaba el Gran Colisionador Electrón-Positrón (LEP) del CERN —el Laboratorio Europeo de Física de Partículas, cercano a Ginebra— tenía una probabilidad significativa de incluir un bosón de Higgs. No encontró ninguno antes de que lo cerrasen en el año 2000 para ceder el sitio al Gran Colisionador de Hadrones (LHC), si bien ciertos indicios de que dio con uno justo en sus límites de energía e intensidad dejaron con la miel en los labios. El Higgs debe, por lo tanto, pesar más de unas 120 masas de protón. Sin embargo, el LEP aportó indicios indirectos de que existe un bosón de Higgs: en el acelerador se realizaron mediciones precisas que cabe combinar con otras similares del Tevatrón y del colisionador del Centro del Acelerador Lineal de Stanford. El conjunto de datos concuerda con la teoría sólo si se incluyen ciertas interacciones entre partículas y el bosón de Higgs más ligero y sólo si el bosón de Higgs más ligero no pesa más de

BRYAN CHRISTIE DESIGN

EL INVENTARIO COSMICO

La teoría del campo de Higgs explica cómo las partículas elementales, los bloques constituyentes más pequeños del universo, adquieren su masa. Pero el mecanismo de Higgs no es la única fuente de masa-energía en el universo ("masa-energía" se refiere a la masa y a la energía ligadas por la fórmula de Einstein $E = mc^2$).

Cerca del 70 por ciento de la energía del universo es una "energía oscura", que no se asocia directamente a partículas. El principal signo de la existencia de la energía oscura reside en la aceleración de la expansión del universo. La naturaleza exacta de la energía oscura constituye una de las cuestiones sin respuesta más profundas de la física.

El 30 por ciento restante de la masa-energía del universo viene de la materia, de las partículas con masa. A la clase que nos es más familiar de materia pertenecen los protones, los neutrones y los electrones, que forman las estrellas, los planetas, todo lo que vemos, incluidos nosotros. Estas partículas proporcionan cerca de un sexto de la materia del universo, o de un 4 a un 5 por ciento de la masa-energía del universo. Como se explica en el texto principal, la mayor parte de esta masa de la materia ordinaria se debe a la energía del movimiento de los quarks y de los gluones en el interior de protones y neutrones.

Una contribución bastante menor a la materia del universo es la de los neutrinos, partículas de las que existen tres variedades. Los neutrinos tienen masa, pero en una cantidad sorprendentemente pequeña. Sus masas absolutas no se han medido todavía. Los datos les ponen un límite superior, menos de la mitad del uno por ciento del universo.

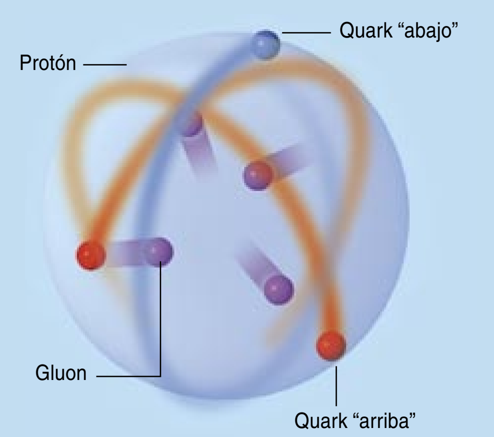
Casi todo el resto de la materia —alrededor del 25 por ciento de la masa-energía total del universo— es materia que no vemos, o materia oscura. Deducimos su existencia de sus efectos gravitacionales sobre lo que vemos. Todavía no sabemos en qué consiste realmente, aunque hay propuestas sólidas. Están en curso experimentos para comprobarlas. La materia oscura ha de componerse de partículas con masa porque bajo los efectos de la fuerza de la gravedad forma cúmulos de tamaño galáctico. Argumentos de diversa índole nos han llevado a concluir que la materia oscura no puede componerse de partículas normales del modelo estándar.

La principal partícula candidata a componente de la materia oscura es la "supercompañera más ligera" (LSP), de la que se habla con más detalle en el texto principal. La supercompañera más ligera aparece en las extensiones del modelo estándar, o modelos estándar supersimétricos. Se piensa que su masa debe de centuplicar, más o menos, la del protón. Los teóricos sabían que podía constituir la materia oscura antes de que los cosmólogos descubriesen que se necesitaba una nueva forma de materia fundamental que explicase la materia oscura.

EL UNIVERSO

Energía oscura
Materia oscura
Materia visible
Neutrinos

1. LA MASA-ENERGIA del universo se reparte en cuatro tipos: la energía oscura que acelera la expansión del universo, la materia oscura invisible que detectamos por sus efectos gravitacionales, la materia visible y los neutrinos.



2. LA MAYOR PARTE de la masa visible se concentra en protones y neutrones. Cada uno de éstos consta de quarks y gluones. Casi toda la masa del protón o del neutrón viene de la energía del movimiento de los quarks y de los gluones.

unas 200 masas de protón. Se obtiene así un límite superior de la masa del bosón de Higgs, que ayudará a centrar la búsqueda.

Durante los próximos años, el único colisionador que podría conseguir pruebas directas de los bosones de Higgs será el Tevatrón. Su energía basta para descubrir un bosón de Higgs que caiga en el intervalo de masas que se deduce de los indicios indirectos del LEP, *siempre y* cuando alcance con regularidad la intensidad de haz que era de esperar alcanzaría, si bien hasta ahora ha resultado inasequible. En 2007, el LHC, siete veces más energético y diseñado para que ofrezca una intensidad mucho mayor que la del Tevatrón, debería empezar a tomar datos. Será una fábrica de bosones de Higgs (producirá muchas de esas partículas al día). Suponiendo que funcione de acuerdo con lo previsto, en la recopilación de los datos pertinentes y en su interpretación se invertiría de uno a dos años. Realizar las pruebas completas que demuestren con todo detalle que las interacciones con los campos de Higgs generan la masa requerirá que un nuevo colisionador de electrones y positrones se añada al LHC (donde chocan protones) y el Tevatrón (donde colisionan protones y antiprotones).

La materia oscura

Lo que se descubra sobre los bosones de Higgs no sólo determinará si el mecanismo de Higgs proporciona la masa; señalará también la manera en que el modelo estándar puede generalizarse para solucionar otros problemas, entre ellos el origen de la materia oscura.

Con respecto a la materia oscura, una partícula clave en los modelos estándar supersimétricos es la “supercompañera más ligera” (LSP). Entre las supercompañeras de las partículas ya conocidas del modelo estándar y predichas por las versiones supersimétricas de éste, la LSP es la que tiene menor masa. La mayoría de las supercompañeras se desintegran rápidamente en supercompañeras de masa menor, una cadena de desintegraciones que acaba en la LSP, que es estable porque no existe ninguna partícula más ligera en la que desintegrarse. (Cuando una supercompañera se desintegra, por lo menos uno de los productos de la desintegración debe ser otra supercompañera; no debe desintegrarse enteramente en partículas del modelo estándar.) Al comienzo de la gran explosión debieron crearse partículas supersimétricas, aunque se desintegrarían enseguida en LSP. La partícula LSP constituye el candidato ideal para la materia oscura.

Los bosones de Higgs pueden afectar directamente a la cantidad de materia oscura del universo. Sabemos que la cantidad de partículas LSP existentes debe ser menor que la que hubiese a poco de la gran explosión, porque una fracción de las mismas chocaría y se aniquilaría dejando tras de sí quarks, leptones y fotones. La tasa de aniquilación quizá dependió de la interacción entre LSP y bosones de Higgs.

Según hemos mencionado antes, los dos campos básicos de Higgs de los modelos estándar supersimétricos confieren la masa a las partículas del modelo estándar y *parte* de su masa a las supercompañeras, a la LSP por lo tanto. Las supercompañeras adquieren su otra parte de masa vía interacciones adicionales, con otros campos de Higgs o con campos similares al de Higgs. Se han avanzado modelos teóricos de estos procesos, pero mientras no dispongamos de datos sobre las propias supercompañeras careceremos de un conocimiento preciso. Tales datos habrán de suministrarlos el LHC o quizás incluso el Tevatrón.

Puede que las masas de los neutrinos se deban también a las interacciones con Higgs adicionales o con campos del tipo de los campos de Higgs. Ocurriría de una manera muy interesante. Se suponía que los neutrinos carecían de masa, pero desde 1979 se ha venido prediciendo que sí tienen masa, aunque pequeña. Durante los últimos diez años, varios experimentos impresionantes han confirmado las predicciones. La masa del neutrino no alcanza la millonésima de la del electrón, la siguiente en la escala. Como los neutrinos son eléctricamente neutros, la descripción teórica de sus masas es más sutil que para las partículas dotadas de carga. Varios procesos contribuyen a la masa de cada especie de neutrinos; por razones técnicas, el valor real de la masa emerge de solucionar una ecuación, no de sumar los términos.

Así pues, hemos entendido las tres maneras en que surgen las masas: el tipo de masa con el que estamos familiarizados —la de protones y neutrones y, por lo tanto, de átomos— viene del movimiento de los quarks ligados en protones y neutrones. La masa del protón sería la que es incluso sin el campo de Higgs. Las masas de los propios quarks, sin embargo, y también la masa del electrón, se deben enteramente al campo de Higgs. Esas masas se anularían sin él. Por último, pero no menos importante, la mayor parte de las masas de las supercompañeras y, por lo tanto, la masa de la partícula de la materia oscura (si constituye en verdad la supercompañera más ligera), proceden de interacciones adicionales que van más allá de la interacción de Higgs básica.

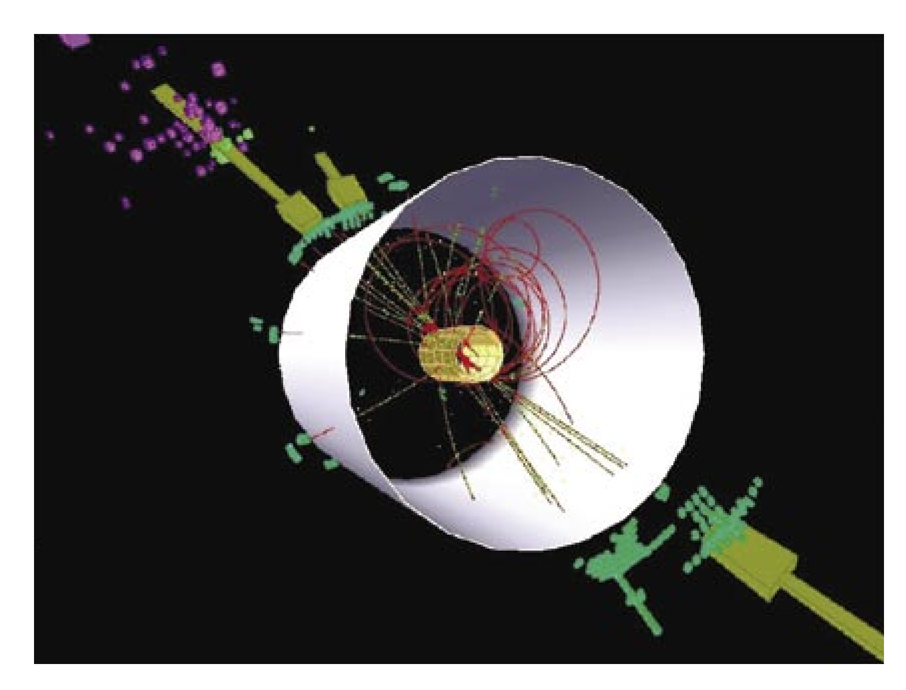
Consideremos finalmente el “problema de las familias”. En el último medio siglo se ha demostrado que el mundo que vemos —personas, flores, estrellas— está construido por seis tipos de partículas: tres partículas de materia (quarks arriba y abajo y electrones), dos cuantos de fuerza (fotones y gluones) y bosones de Higgs. Se trata de una descripción de una asombrosa simplicidad. Con todo, hay cuatro quarks más, otras dos partículas similares al electrón y tres neutrinos. Todas estas partículas o tienen una vida media muy corta, o apenas interaccionan con las otras seis partículas. Pueden clasificarse en tres familias: arriba, abajo, neutrino electrónico y electrón; encanto, extraño, neutrino muónico y muon; cima, fondo, neutrino tauónico y tau. Las partículas de cada familia desarrollan interacciones idénticas a las de las partículas de las otras familias. Sólo se diferencian en que las de la segunda familia son más intensas que las de la primera y las de la tercera familia más que las de la segunda. Como estas masas surgen de interacciones con el campo de Higgs, las partículas deben tener diferentes interacciones con dicho campo.

Por lo tanto, el problema de las familias consta de dos partes: ¿Por qué hay tres familias si sólo parece requerirse una para describir el mundo que vemos? ¿Por qué las familias difieren en la masa y tienen la masa

que tienen? Quizá no resulte obvio por qué los físicos se asombran de que en la naturaleza haya tres familias casi idénticas cuando bastaría una sola. Nos sorprende porque queremos comprender las leyes de la naturaleza, las partículas y las fuerzas básicas. Esperamos que todos los aspectos de las leyes básicas sean necesarios. Perseguimos una teoría en la cual todas las partículas y sus cocientes de masas emerjan inevitablemente, sin recurrir a hipótesis *ad hoc* acerca de los valores de las masas, ni ajustar parámetros. Si resulta imprescindible la existencia de tres familias, se trata de una pista cuyo significado no entendemos.

Encaje de todas las piezas

En el modelo estándar y sus ampliaciones supersimétricas encaja la estructura familiar observada, pero no pueden explicarla. Entiéndase en el sentido más fuerte. No es que los modelos estándar supersimétricos *todavía* no haya explicado las familias; es que *no pueden*. Para mí, el aspecto más apasionante de la teoría de cuerdas consiste en que no sólo nos puede proveer de una teoría cuántica de todas las fuerzas, sino que podría también aclararnos qué son las partículas elementales y por qué hay tres familias. La teoría de cuerdas parece en condiciones de abordar la razón de que las interacciones con el campo de Higgs difieran de una familia a otra. En teoría de cuerdas puede haber familias repetidas, sin ser idénticas. Las diferencias entre ellas vienen dadas por características que no afectan a las fuerzas fuertes, electromagnéticas, débiles o gravitacionales, sino a las interacciones con los campos de Higgs, lo que concuerda con que haya tres familias de masas diversas. Aunque los teóricos de cuerdas todavía no han solucionado el problema de que existan tres familias, la doctrina parece tener la estructura adecuada para proporcionar una solución. La teoría de cuerdas permite muchas estructuras familiares diversas. Ignoramos por qué la naturaleza escoge la que observamos en vez de alguna otra. Los datos de las masas de los quarks y leptones y de las masas de sus supercompañeras quizás aporten pistas importantes que nos instruyan acerca de la teoría de cuerdas.



3. UNA PARTICULA DE HIGGS se creó quizá cuando chocaron un positrón y un electrón de gran energía en el detector "L3" del Gran Colisionador de Electrones y Positrones del CERN. Las líneas representan trazas de partículas. Las bolas verdes y púrpuras y los histogramas dorados representan cantidades de energía depositadas en las capas del detector por las partículas engendradas en la reacción. Sólo combinando muchos de tales acontecimientos se puede concluir si las partículas de Higgs estuvieron presentes en algunas de las reacciones o si produjeron los datos otras reacciones que imitaron la señal de la partícula de Higgs.

CHRIS TULLY *Universidad de Princeton*

Ahora se entiende por qué se ha tardado tanto en empezar a comprender la masa. Sin el modelo estándar de la física de partículas y sin el desarrollo de la teoría cuántica de campos para describir las partículas y sus interacciones, no se habrían podido ni formular las preguntas correctas. Queda mucho por averiguar sobre los orígenes y los valores de las masas, pero es probable que el marco necesario para ello se halle bien pergeñado. La masa no se podía comprender antes de que existieran teorías tales como el modelo estándar, su extensión supersimétrica y la teoría de cuerdas. Aunque no está claro todavía que vayan a proporcionar una respuesta cabal, han convertido ya la masa en un tema común de investigación de la física de partículas.

El autor

Gordon Kane ocupa la cátedra Victor Weisskopf de física de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Su investigación se centra en la búsqueda de vías posibles para probar y extender el modelo estándar de la física de partículas y su integración con la teoría de cuerdas.

Bibliografía complementaria

THE PARTICLE GARDEN. Gordon Kane. Perseus Publishing, 1996.

THE LITTLE BOOK OF THE BIG BANG: A COSMIC PRIMER. Craig J. Hogan. Copernicus Books, 1998.

MASS WITHOUT MASS II: THE MEDIUM IS THE MASS-AGE. Frank Wilczek en *Physics Today*, vol. 53, n.º 1, págs. 13-14; enero 2000.

SUPERSYMMETRY: UNVEILING THE ULTIMATE LAWS OF NATURE. Gordon Kane. Perseus Publishing, 2001.

Almacenamiento del dióxido de carbono bajo tierra

Bombear dióxido de carbono bajo tierra para evitar el calentamiento atmosférico es factible, pero sólo si se cumplen ciertas condiciones

Robert H. Socolow

Cuando William Shakespeare tomaba aire, 80 moléculas de cada millón que entraban en sus pulmones eran de dióxido de carbono. Hoy, 380 moléculas de cada millón que inspiramos son de dióxido de carbono. Esa proporción asciende unas dos moléculas por año.

Se desconocen las consecuencias exactas de este aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, los efectos que nos esperan a medida que ese gas vaya abundando más en el aire en las décadas venideras. La humanidad está realizando un experimento con el mundo. Se sabe que el dióxido de carbono está calentando la atmósfera, calor que se propaga al mar y eleva su nivel. Se sabe que el CO_2 absorbido por el océano está acidificando el agua. Pero no existe un conocimiento exacto de cómo se alterará el clima en todo el globo, con qué rapidez subirá el nivel del mar, qué consecuencias tendrá un océano más ácido, qué ecosistemas continentales y marinos serán más vulnerables al cambio climático y cómo esas variaciones

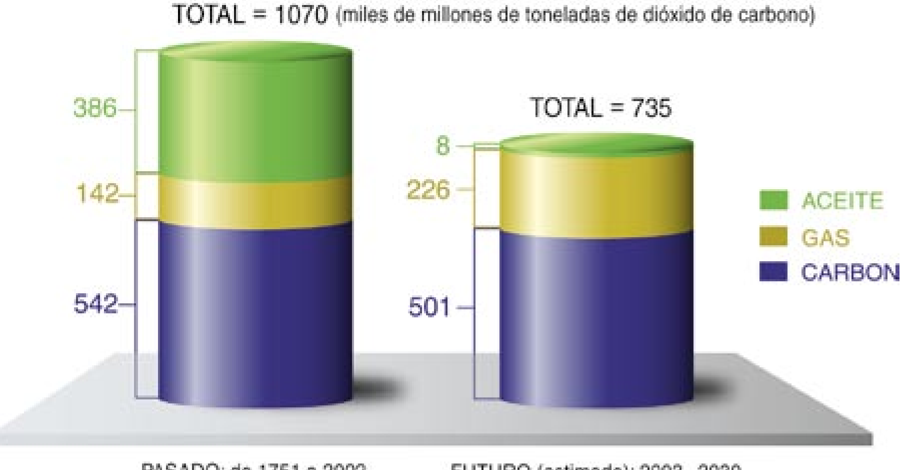
1. TORRES DE SEPARACION en una instalación de extracción de gas en Argelia, en pleno desierto de Sahara. Las torres separan químicamente el dióxido de carbono del gas natural destinado a los mercados europeos. El CO_2 se bombea después dos kilómetros bajo tierra.

CORTESIA DE BP plc

afectarán a la salud y el bienestar humanos. El camino que seguimos nos está trayendo un cambio climático más veloz que nuestra capacidad de calibrar sus consecuencias.

Si fuese fácil retardar la velocidad de acumulación del dióxido de carbono, ya se estaría haciendo. Si fuera imposible, ya se trabajaría para adaptarse a las consecuencias. Pero la realidad está entre lo uno y lo otro. La tarea se puede realizar con herramientas ya disponibles, aunque no con facilidad, ni a bajo precio y sin controversia.

Si la sociedad se propusiera dar prioridad a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono —como creo que debería hacer para reducir el riesgo de un desastre ambiental en el futuro—, tendríamos que adoptar varias medidas inmediatamente. Deberíamos usar la energía de manera más eficaz y sustituir los combustibles fósiles —carbón, petróleo y gas natural, las fuentes antropogénicas primarias del dióxido de carbono atmosférico— por fuentes que no dependan del carbono, renovables o de energía nuclear. Y emplearíamos un método que está recibiendo creciente atención: capturar el dióxido de carbono y almacenarlo —o "secuestrarlo"— bajo tierra para que no escape a la atmósfera. No hay ninguna necesidad de que el dióxido de carbono se emita a la atmósfera. Esta ha sido nuestro principal almacén de desperdicios: el enviar los humos por chimeneas industriales o domésticas y tubos de escape resulta más sencillo y a corto plazo menos costoso. La buena nueva es que ya existen procedimientos para capturar y almacenar esos gases residuales. Los obstáculos que dificultan su aplicación parecen superables.



2. EMISIONES DE CARBURANTES FOSILES de las centrales térmicas que se proyecta construir durante el próximo cuarto de siglo, a lo largo de las docenas de años en que estarán funcionando; su volumen será comparable al alcanzado por todas las emisiones de los últimos 250 años. La columna de la izquierda muestra las emisiones acumuladas de dióxido de carbono producidas al quemar carbón, petróleo y gas natural para todos los usos (incluyendo el transporte y la calefacción de edificios) de 1751 a 2002. La columna de la derecha representa las emisiones de CO_2 de las centrales térmicas de carburante fósil que, según la Agencia Internacional de la Energía, entrarán en funcionamiento entre los años 2003 y 2030. El cálculo se basa en que las centrales de carbón operen durante 60 años y las de gas natural durante 40.

ALISON KENDALL (*ilustración*); IDEA DE DAVID HAWKINS *Natural Resources Defense Council*; DATOS HISTORICOS DE GREGG MARLAND *Laboratorio Nacional de Oak Ridge*

La captura del dióxido de carbono

La combustión de carburantes fósiles produce enormes cantidades de dióxido de carbono. En principio, se podrían instalar equipos que secuestrasen el gas allá donde se quemen hidrocarburos, pero no todas las circunstancias se prestan por igual a ello.

Si un automóvil consume 10 litros por cada 100 kilómetros y al año recorre unos 13.000 km, habrá que comprar en ese tiempo alrededor de 1300 litros de gasolina, que vienen a pesar una tonelada. Quemar esa cantidad de gasolina envía a la atmósfera por el tubo de escape unas tres toneladas de dióxido de carbono. Aunque cabe imaginar que el CO_2 se almacenase antes de que saliera del coche y finalmente se vertiera en una estación de servicio, no parece haber manera práctica de hacerlo. Más factible sería almacenar el CO_2 de las centrales térmicas de carbón. Por eso, el empeño en capturar y almacenar el gas se centra sobre todo en esas instalaciones, de las que mana la cuarta parte de las emisiones mundiales de dióxido de carbono.

Una central de carbón nueva y grande, que genere 1000 megawatt, produce seis millones de toneladas anuales de CO_2 (equivale a las emisiones de dos millones de automóviles). La producción total mundial de CO_2 —equivalente a la producción de 1000 centrales grandes— quizá se duplique durante las próximas décadas a medida que los EE.UU., China, India y otros países construyan nuevas centrales térmicas y reemplacen las antiguas (*véase la figura 2*). Cuando las nuevas instalaciones de carbón entren en funcionamiento en el próximo cuarto de siglo, se las podría equipar para que filtrasen su dióxido de carbono y no escape éste por las chimeneas.

En la actualidad, una compañía eléctrica que se proponga invertir en una nueva central de carbón puede elegir entre dos sistemas de producción; hay un tercero en desarrollo. Los tres se pueden modificar para secuestrar el carbono. Las centrales térmicas tradicionales de carbón lo queman completamente, en aire y en un solo paso. El calor que se libera convierte agua en vapor a alta presión, que mueve una turbina que genera electricidad. Cuando no se modifica este sistema —el pilar de la producción de energía mediante carbón en el siglo pasado—, por las chimeneas sale una mezcla de los gases de escape a presión atmosférica a los que se les ha eliminado ya el azufre. Sólo alrededor del 15 por ciento de esos gases de escape es dióxido de carbono; el resto consiste sobre todo en nitrógeno y vapor de agua. A fin de capturar el CO_2 que este procedimiento crea, se podría reemplazar la chimenea por una torre de absorción, en la cual los gases de escape entrarían en contacto

con gotículas de aminas, sustancias químicas que absorben el CO_2 selectivamente. En una segunda columna de reacción, la torre de separación, la amina líquida se calienta para liberar CO_2 concentrado y regenerar el absorbente químico.

El otro sistema ya disponible de producción de energía mediante carbón, la unidad de ciclo combinado de gasificación de carbón, quema primero parcialmente el carbón en presencia de oxígeno, dentro de una cámara de gasificación. Se produce así un gas sintético o "syngas" (hidrógeno a presión y monóxido de carbono). Una vez eliminados los compuestos de azufre y otras impurezas, la planta quema el syngas en aire en una turbina de gas —un motor de reacción modificado— para generar electricidad. El calor de los gases de escape que salen de la turbina de gas convierte el agua en vapor, que se canaliza a una turbina de vapor donde produce energía adicional; por último, los gases de escape salen por la chimenea. En una planta así, para secuestrar dióxido de carbono se añade vapor de agua al syngas, a fin de que la mayor parte del monóxido de carbono se convierta en dióxido de carbono e hidrógeno; a continuación, el sistema de ciclo combinado retira el CO_2 antes de que la combustión del gas restante, ahora hidrógeno en su mayor parte, genere electricidad en una turbina de gas y una turbina de vapor.

El tercer sistema de producción de energía mediante carbón, la "oxicombustión", realizaría la combustión en oxígeno no en aire. Una de sus versiones modificaría el viejo método de la combustión en un solo paso para quemar el carbón en oxígeno. Se generaría así un gas combustible sin nitrógeno; sólo contendría CO_2 y vapor de agua, fáciles de separar. Una segunda versión modificaría el sistema de ciclo combinado de gasificación de carbón usando oxígeno, en lugar de aire, en la turbina de gas para quemar la mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno que saliese del gasificador. Con esa disposición, se evita la reacción de conversión del monóxido de carbono y se produciría de nuevo sólo CO_2 y vapor de agua. Todavía no existen, sin embargo, materiales estructurales capaces de soportar las altas temperaturas que resultan de la combustión en oxígeno. Se está explorando la posibilidad de librarse de esas limitaciones materiales reduciendo la temperatura del proceso mediante la recirculación de los gases de escape de la combustión.

Decisiones difíciles

Las modificaciones necesarias para capturar el dióxido de carbono no sólo añaden directamente complicaciones y gastos; limitan también el rendimiento de la extracción de energía del carburante. En otras palabras, eliminar de forma segura los subproductos del carbono significa extraer y quemar más carbón. Estos costes pueden compensarse en parte si la planta filtra simultáneamente el azufre gaseoso y lo almacena con el CO_2; se evitarían algunos de los considerables gastos del tratamiento del azufre.

Los directivos buscan sacar el máximo provecho de la vida total de la instalación, unos 60 años o más. Deben estimar el gasto de cumplir no ya con las normas ambientales de hoy, sino también con las futuras. Saben que los costes extra de la captura del CO_2 serían probablemente bastante inferiores en las plantas de ciclo combinado de gasificación de carbón que en las instalaciones tradicionales. Eliminar el dióxido de carbono a altas presiones, como se hace cuando se trabaja con gas sintético, cuesta menos porque se pueden emplear dispositivos de menor tamaño. Pero saben también que de momento sólo hay unas pocas centrales de gasificación de carbón (una de ellas en Puertollano); optar por la gasificación requeriría gastos adicionales en dispositivos que aseguren la fiabilidad. Si la dirección cree que no deberá pagar por las emisiones de CO_2 antes de que su nueva planta lleve ya años operativa, elegirá seguramente una planta tradicional de carbón, aunque quizá diseñada de forma que admita una adaptación posterior para el secuestro de carbono. Si, por el contrario, cree que en unos diez años entrarán en vigor normas que obliguen a capturar el CO_2, escogerá una planta de gasificación de carbón.

Para formarse una idea de las presiones económicas que el coste extra del secuestro de carbono representaría para el productor de carbón, la empresa propietaria de la central térmica y quienes consumen electricidad en las viviendas, conviene hacer una estimación razonable del coste y evaluar después los efectos. Se calcula que el gasto total extra de capturar y almacenar una tonelada de dióxido de carbono en una planta de gasificación de carbón de ciclo combinado rondaría los 25 dólares. (Sería el doble en una planta tradicional de vapor que aplicase la técnica actual. En ambos casos, costará menos cuando se disponga de técnicas nuevas.)

El productor de carbón, el operador de la central y el propietario de la vivienda percibirán ese aumento del coste en 25 dólares de manera muy diferente. El productor de carbón apreciará que la extracción y el almacenamiento del carbono del carbón suman unos 60 dólares por

Resumen/Enterrar CO_2

- El secuestro de las emisiones de dióxido de carbono procedentes de las centrales térmicas de carbón y su inyección subsiguiente en formaciones geológicas para su almacenamiento a largo plazo contribuiría a retrasar la subida de la concentración atmosférica de CO_2.
- Las técnicas de bajo coste que retiren el dióxido de carbono de las emisiones de las centrales térmicas y una mayor experiencia en la inyección de CO_2 que enseñe a evitar las pérdidas hacia la superficie son la clave del éxito del secuestro y almacenamiento de CO_2 a gran escala.
- Abundan las oportunidades de capturar y almacenar CO_2 con un coste aceptable. El dióxido de carbono adquiere valor económico cuando se usa para extraer crudo en campos petrolíferos maduros. La purificación del gas natural y la producción industrial de hidrógeno proporcionan CO_2 a bajo precio. Los primeros proyectos que liguen estas industrias reforzarán la capacidad técnica de los operadores y estimularán el desarrollo de normas que rijan los procedimientos de almacenamiento de CO_2.

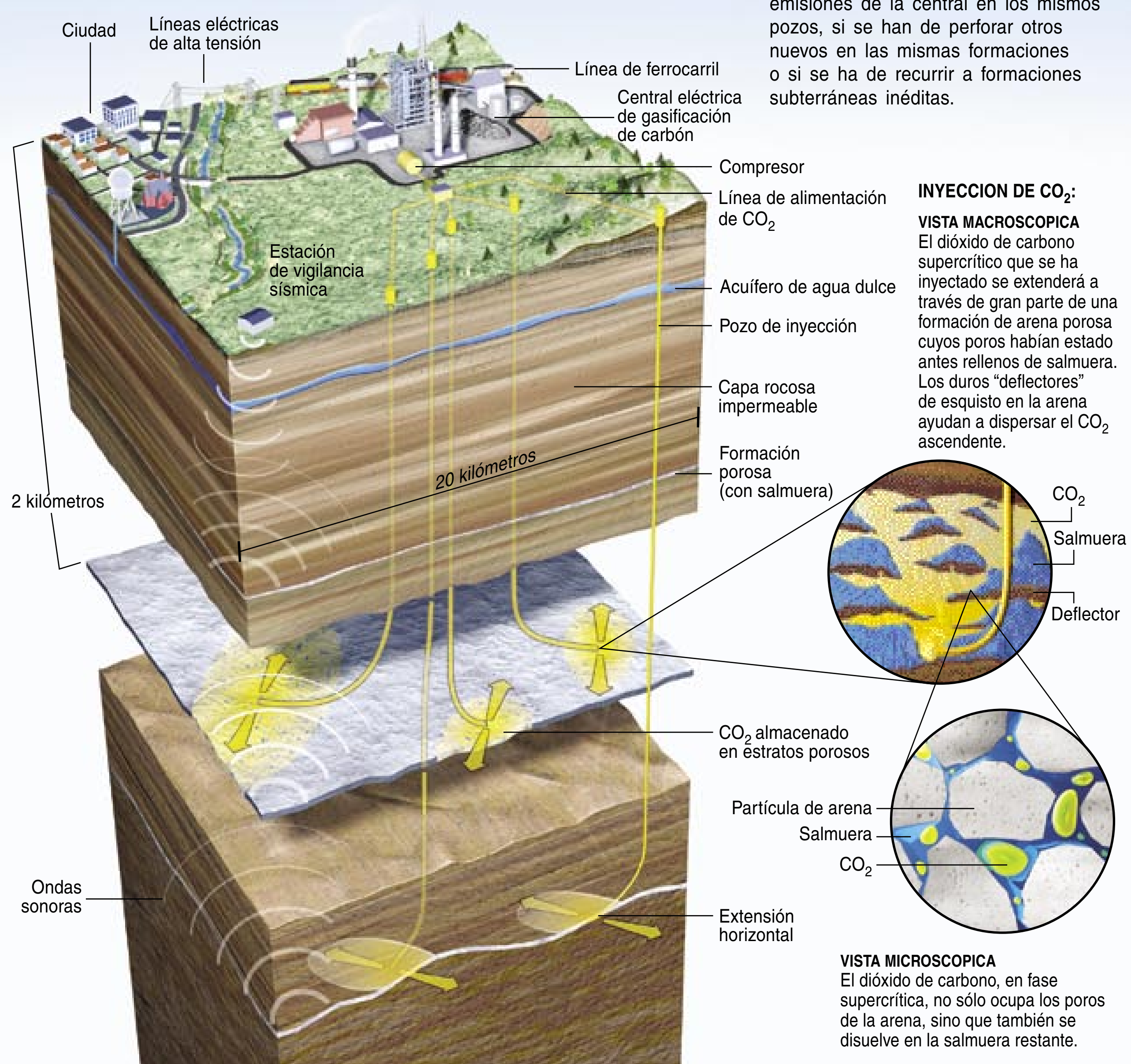
UNA FUTURA CENTRAL TERMICA DE COMBUSTIBLE FOSIL

Imagínese una ciudad cercana a una futura central térmica de 1000 megawatt, una central de gasificación de carbón que secuestra dióxido de carbono desde hace diez años. La ciudad se abastece de un acuífero somero al que no afecta la inyección de CO_2. Un ferrocarril transporta el carbón a la planta y las líneas de alta tensión se llevan la electricidad que genera.

Durante esos primeros diez años de funcionamiento se han capturado unos 60 millones de toneladas de CO_2, que ahora descansan repartidos en enormes tortas de gas en los estratos subterráneos porosos. El dióxido de carbono se ha ido inyectando a través de pozos horizontales en dos profundas formaciones con salmuera, cada una situada, bajo una capa rocosa impermeable, a más de dos kilómetros de profundidad. Con una densidad siete décimas partes la del agua, el CO_2, "supercrítico" a alta presión, ocupa casi 90 millones de metros cúbicos. En ambas formaciones, el 10 por ciento del volumen corresponde a los poros, y un tercio de éstos están llenos de CO_2. Dos tercios del gas inyectado se han bombeado en la formación superior, de 40 metros de espesor, y un tercio ha sido enviado a la inferior, de 20 metros. Como resultado, la superficie horizontal de roca porosa impregnada de dióxido de carbono supercrítico en cada formación abarca 40 kilómetros cuadrados.

Obsérvese que las escalas horizontal y vertical representadas aquí son diferentes. La profundidad de cada pozo de inyección y la longitud de sus dimensiones horizontales son aproximadamente iguales, unos dos kilómetros. Tampoco las estructuras de los edificios están representadas a escala.

Los técnicos de una estación sísmica de vigilancia exploran las localizaciones del CO_2 mediante ondas sonoras que inciden en el suelo. Durante ese decenio inicial de funcionamiento de la central térmica, habrán descubierto muchos detalles de la geología local gracias a la observación de la difusión del CO_2 por la zona. Esta información les ayudará a decidir si se han de continuar inyectando las emisiones de la central en los mismos pozos, si se han de perforar otros nuevos en las mismas formaciones o si se ha de recurrir a formaciones subterráneas inéditas.

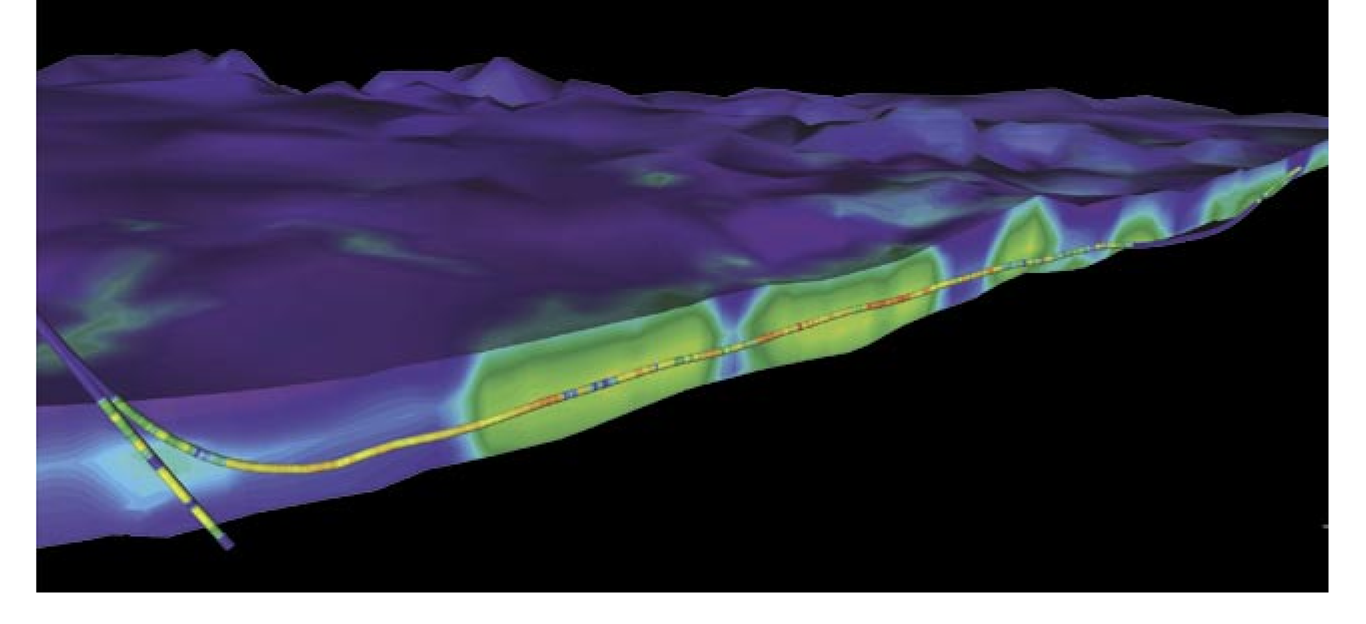


INYECCION DE CO_2:

VISTA MACROSCOPICA
El dióxido de carbono supercrítico que se ha inyectado se extenderá a través de gran parte de una formación de arena porosa cuyos poros habían estado antes rellenos de salmuera. Los duros "deflectores" de esquisto en la arena ayudan a dispersar el CO_2 ascendente.

VISTA MICROSCOPICA
El dióxido de carbono, en fase supercrítica, no sólo ocupa los poros de la arena, sino que también se disuelve en la salmuera restante.

DAVID FIERSTEIN (*ilustración*); IDEA DE JULIO FRIEDMANN *Laboratorio Nacional Lawrence Livermore*



3. LA POROSIDAD DE UNA FORMACION GEOLOGICA vecina a un pozo de inyección de dióxido de carbono (*tubo delgado*) en el campo de Krechba, en el desierto argelino, se conoce gracias a dos grupos de medidas. (El rojo y el amarillo representan regiones de alta porosidad de este depósito natural de 20 metros de espesor; el azul indica regiones de baja porosidad.) Los ingenieros de la British Petroleum (BP) se valieron de un tosco mapa de los estratos geológicos, deducido de sondeos sísmicos de ecolocalización, para determinar el mejor lugar donde perforar el pozo. Una sonda introducida en la perforación, un sensor eléctrico, aportó una representación más detallada de la porosidad (las cuentas de color) a unos pocos centímetros del pozo. Los ingenieros emplearon esos datos más afinados para buscar regiones de alta porosidad y dirigir el aparato de perforación hacia ellas.



tonelada de carbón, más o menos el triple del precio del carbón que vende a la planta de producción eléctrica. El propietario de una nueva central térmica de carbón se enfrentaría a un aumento de un 50 por ciento en el coste de la energía que la planta de carbón pone en la red, unos dos centavos por kilowatt-hora (kWh) que habría que sumar al coste básico de unos cuatro centavos por kWh. El propietario de una vivienda que adquiriese sólo electricidad producida mediante carbón, que ahora paga, en promedio, unos 10 centavos por kWh, experimentaría unos costes de electricidad alrededor de una quinta parte más altos (supuesto que los dos centavos extra por kWh por captura y almacenamiento revertiesen sin aumento en los cargos por transmisión y distribución).

Primer paso y pasos futuros

La captura y almacenamiento del dióxido de carbono no tiene que esperar a la construcción de nuevas centrales de carbón. Ambos procesos se desarrollan en plantas que producen hidrógeno de uso industrial o purifican gas natural (metano) para la calefacción y la generación de energía. Estas operaciones generan corrientes concentradas de CO_2. Los procesos de generación de hidrógeno industrial, que se realizan en refinerías de petróleo y fábricas de amoníaco, extraen el dióxido de carbono de una mezcla a alta presión de hidrógeno y CO_2 y envían éste a la atmósfera. Las plantas de purificación de gas natural deben eliminar el CO_2: si el metano acaba en un tanque de gas natural licuado, no deberá contener dióxido de carbono, pues al solidificarse con el frío de la licuación (al convertirse en hielo seco), cegaría el sistema; y si circula por la red de distribución de gas natural, la concentración de CO_2 (por encima del 3 por ciento) resulta demasiado elevada.

Hay en estudio diversos proyectos de secuestro del dióxido de carbono creado en esas fuentes. La producción de hidrógeno y la purificación del gas natural preludiarían la captura completa del carbono en las plantas de producción de energía; mundialmente, aquellas dos actividades arrojan una cantidad de dióxido de carbono que viene a ser un 5 por ciento de la emitida en la generación de energía eléctrica.

Dada la creciente demanda de petróleo para los coches, algunas naciones, China por ejemplo, adoptan el carbón como materia prima en la fabricación de combustibles sintéticos que sustituyen a la gasolina y al aceite pesado. Desde la perspectiva del cambio climático, se trata de un paso atrás. Al quemar un combustible sintético no basado en la gasolina, sino en el carbón, se desprende alrededor del doble de dióxido de carbono, si se suman los gases del escape y las emisiones de las plantas de fabricación de los combustibles sintéticos. En la producción de combustibles sintéticos a partir del carbón, sólo la mitad del carbono de éste acaba en el combustible; la otra mitad se expulsa en la planta de producción. Se podría modificar la ingeniería de una planta de obtención de combustibles sintéticos a partir del carbón para que absorbiera las emisiones de CO_2. En el futuro, los coches quizá funcionen con electricidad o hidrógeno libre de carbono, extraído del carbón en factorías donde se secuestre CO_2.

También se puede obtener electricidad de combustibles de biomasa. Nos referimos a combustibles comerciales derivados de materiales de origen vegetal: cosechas y sus residuos, desechos de las industrias maderera y papelera, y gas de vertederos. Si se prescinde de los combustibles fósiles usados en la cosecha y el procesado, los intercambios entre la atmósfera y el suelo se compensan: la cantidad de dióxido de carbono liberada por una central térmica tradicional de biomasa se aproxima a la eliminada de la

atmósfera por la fotosíntesis de plantas vivas. Pero la energía obtenida de la biomasa aún puede ofrecer un resultado mejor: si a esas centrales se les añadiesen equipos que capturaran el carbono y se replantase la vegetación seca, al final se retiraría del aire CO_2. Desgraciadamente, el bajo rendimiento de la fotosíntesis limita esta oportunidad de limpiar la atmósfera: se necesitan grandes extensiones de terreno para cultivar árboles o cereales. Sin embargo, las técnicas del futuro podrían cambiarlo. Quizá llegue a ser factible una eliminación más eficaz del dióxido de carbono por las plantas verdes y la captura directa del CO_2 del aire (por ejemplo, haciendo fluir el aire sobre un absorbente químico).

Almacenamiento del dióxido de carbono

Por supuesto, la captura del carbono es sólo la mitad del trabajo. Cuando una empresa eléctrica construye una central de carbón de 1000 megawatt proyectada para apresar el CO_2, ha de disponer de silos donde almacenar con seguridad los seis millones de toneladas anuales del gas que la central generará mientras funcione. Se cree que, en la mayoría de los casos, no habría mejor destino que las formaciones subterráneas de rocas sedimentarias plagadas de poros, ahora rellenos de salmuera. Para ser adecuados, los emplazamientos tendrían que hallarse muy por debajo de cualquier fuente de agua potable, al menos a 800 metros de profundidad. A 800 metros, la presión ambiental es 80 veces la atmosférica, suficiente para que el CO_2 inyectado a presión se encuentre en una fase "supercrítica" en la que es casi tan denso como la salmuera a la que reemplaza en las formaciones geológicas. Algunas veces se encontrará también petróleo crudo o gas natural en una formación con salmuera, a donde llegaron millones de años atrás.

Las cantidades de dióxido de carbono enviadas bajo tierra se pueden expresar en "barriles", la unidad de volumen igual a 159 litros empleada por la industria del petróleo. En una planta de carbón de 1000 megawatt modificada para la captura del carbono se almacenarían al año unos 50 millones de barriles de dióxido de carbono supercrítico: unos 100.000 barriles diarios. Tras 60 años de funcionamiento, se habrían enterrado bajo la superficie unos 3000 millones de barriles (medio kilómetro cúbico). Un campo petrolífero que produjese 3000 millones de barriles multiplicaría por seis el tamaño del menor de los campos que en la jerga petrolera llaman "gigantes", de los que existen unos 500. Cada una de las plantas de carbón grandes modificadas tendría que estar asociada a un "gigantesco" depósito natural que almacenara el CO_2. Unos dos tercios del billón de barriles de petróleo que el mundo ha producido salieron de esos campos petrolíferos gigantes, de modo que ya se tiene una experiencia considerable con operaciones de la escala de las necesarias para el almacenamiento del carbono.

Muchos de los primeros puntos de secuestro se establecerán porque producirán beneficios. Entre ellos habrá antiguos campos petrolíferos en los que se pueda inyectar dióxido de carbono para estimular la producción de crudo. Esta "extracción potenciada de petróleo" aprovecha lo adecuado que el CO_2 a presión es, química y físicamente, para desplazar el petróleo que queda retenido en los poros de los estratos geológicos, una vez pasadas las primeras fases de la explotación de los pozos. Unos compresores introducen el CO_2 en ese petróleo; las reacciones químicas dan por resultado un crudo modificado que se moverá con mayor facilidad a través de la roca porosa hasta los pozos de producción. En particular, el CO_2 reduce la tensión interfacial del crudo, una forma de tensión superficial que determina la magnitud del rozamiento entre el petróleo y la roca. El dióxido de carbono inyectaría nueva vida en los campos petrolíferos.

En respuesta a los estímulos que el gobierno británico ofrece al secuestro

OTRAS ESTRATEGIAS DE ALMACENAMIENTO DEL CO_2

El dióxido de carbono secuestrado se podría almacenar no solamente en bolsas de petróleo y gas vaciadas y en formaciones subterráneas de salmuera, sino también en minerales que formen compuestos carbonatados, en vetas de carbón y en las profundidades oceánicas.

Los minerales que pueden convertirse en carbonatos valdrían, en principio, para secuestrar todavía más dióxido de carbono en la superficie terrestre que las formaciones con salmuera de las profundidades. El óxido de magnesio en la serpentina y el olivino, dos abundantes minerales de hierro y magnesio, se combinan con el CO_2 para producir carbonato de magnesio, muy estable. El problema estriba en conseguir que el CO_2 reaccione con grandes cantidades de esas rocas, quizá pulverizándolas para aumentar la superficie en que se desarrollan las reacciones químicas.

Las superficies porosas adsorben metano en el interior de las formaciones carboníferas. Durante la explotación minera, parte de este metano se libera, lo que causa con demasiada frecuencia explosiones y la muerte de mineros. Se podría introducir dióxido de carbono a presión en el interior de las vetas de carbón no explotadas, donde reemplazaría al metano adsorbido, que se podría recuperar y vender como carburante.

La inyección de dióxido de carbono en los mares crea cierta inquietud. Los partidarios del almacenamiento en las profundidades oceánicas aducen que el CO_2 atmosférico pasa continuamente a través de la superficie oceánica mientras el sistema aire-océano persigue su equilibrio químico. Hacer más lento el aumento del nivel de CO_2 en el aire reduciría la cantidad que se disuelve en las aguas superficiales. Así, la inyección en las profundidades oceánicas equivaldría a trasladar parte del CO_2 de las aguas superficiales a las capas más profundas. El impacto ambiental en la vecindad de la superficie, donde se encuentra la mayor parte de la vida marina, se reduciría. Los oponentes del almacenamiento oceánico se escudan en leyes internacionales que protegen los océanos contra ciertas clases de usos industriales, así como en la dificultad de vigilar el transporte del dióxido de carbono una vez inyectado. En muchas partes del mundo, los oponentes aprovechan el movimiento en pro de unos mares en paz.



4. EL ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO de dióxido de carbono ya se está llevando a cabo hoy, en Salah, en el desierto argelino. El gas natural bruto producido en este campo por BP, Statoil y Sonatrach contiene demasiado CO_2 para usos comerciales, de modo que el exceso se elimina mediante absorbentes químicos (*dos pares de torres de separación en el centro de la planta*), se comprime y después se inyecta a presión en una formación con salmuera a dos kilómetros de profundidad. La inyección subterránea se efectúa a un ritmo sólo unas seis veces menor que el necesario en una planta de gasificación de carbón de 1000 megawatt que estuviese preparada para la captura y almacenamiento del CO_2.

CORTESIA DE BP plc

y almacenamiento del dióxido de carbono, las compañías petrolíferas están proponiendo nuevos proyectos de captura en centrales de gas natural, ligados a planes de extracción potenciada de petróleo en campos submarinos del mar del Norte. En EE.UU., los operadores de estas clases de campos están ganando dinero ya hoy pese a tener que pagar entre 10 y 20 dólares por tonelada de dióxido de carbono introducida en el pozo. No obstante, si los precios del petróleo continúan subiendo, el valor del CO_2 crecerá, porque su uso permitiría la producción de otra mercancía más valiosa. El desarrollo de este mercado podría conducir a un espectacular desarrollo de los planes de captura del dióxido de carbono.

El secuestro del carbono en los campos de petróleo y gas avanzará muy probablemente al mismo tiempo que el almacenamiento en las formaciones ordinarias de salmuera. Estas son, con diferencia, las estructuras más comunes. Los geólogos esperan hallar, en la naturaleza, suficiente capacidad de almacenamiento para acomodar una buena parte del dióxido de carbono que se capture en los combustibles fósiles que se quemarán durante el siglo XXI.

Los riesgos del almacenamiento

Hay dos clases de riesgos que deben tenerse en cuenta en cualquier posible depósito de CO_2: las pérdidas graduales y las pérdidas bruscas. La pérdida gradual de dióxido de carbono sólo reportaría la devolución de parte del gas de invernadero al aire. El escape rápido de grandes cantidades, por el contrario, tendría quizá consecuencias peores que el no haberlo almacenado. Para que una empresa de almacenamiento obtenga su licencia, los responsables habrán de estar seguros de que las pérdidas graduales ocurrirán a un ritmo muy lento y de que la pérdida brusca es sumamente improbable.

Aunque el dióxido de carbono resulta de ordinario inocuo, ha de evitarse una emisión rápida y abundante del gas: las altas concentraciones pueden ser letales. Los ingenieros recuerdan el terrible desastre natural que sucedió en 1986 en el lago Nyos de Camerún. Dióxido de carbono de origen volcánico fue infiltrándose poco a poco en el fondo del lago, que rellena un cráter. Una noche, el brusco ascenso de las aguas del fondo del lago liberó en unas horas entre 100.000 y 300.000 toneladas de CO_2. El gas, que pesa más que el aire, se deslizó a lo largo de dos valles, donde asfixió a 1700 personas y a miles de cabezas de ganado. Se está estudiando esta tragedia para que no ocurra algo similar debido a la mano del hombre. Los responsables de los permisos de almacenamiento desearán garantías de que las fugas no trasladarán el gas a espacios cerrados bajo tierra y vulnerables a fugas repentinas.

Las fugas graduales plantean escaso riesgo para la vida, pero atentarían contra los objetivos climáticos del secuestro. Se están examinando las circunstancias que darían lugar a filtraciones lentas. El dióxido de carbono, que flota en las aguas saladas, ascenderá hasta que tropiece

con una capa geológica impermeable y no pueda subir más.

Comparemos el dióxido de carbono inmerso en una formación porosa con cientos de globos de helio; la capa sólida superior, con la carpa de un circo. Los globos podrán escapar si la carpa tiene un roto o si se inclina de modo que marque una trayectoria que los lleve a un lado y hacia arriba. Los geólogos habrán de buscar fallas en la capa sólida por donde pudiese escapar el CO_2 y determinar la presión de inyección que llegaría a fracturarla. También evaluarán la corriente horizontal, muy lenta, que transportará dióxido de carbono fuera de los puntos de inyección. Con frecuencia, las formaciones sedimentarias recuerdan a tortas, enormes, delgadas. Si el dióxido de carbono se inyecta en la cercanía de la parte central de una torta con una ligera inclinación, podría tardar decenas de miles de años en llegar al borde. Para entonces, se cree, la mayor parte del gas se habrá disuelto en la salmuera o habrá quedado aprisionada en los poros.

Aun cuando la geología fuera favorable, el uso de formaciones de almacenamiento donde hay antiguos pozos puede resultar problemático. En Tejas, por ejemplo, se han perforado más de un millón de pozos, muchos de los cuales se rellenaron con cemento y se abandonaron. Resultaría inquietante que la salmuera cargada de CO_2, que es ácida, de un pozo de inyección se filtrase a otro abandonado, corroyese el tapón de cemento y llegara hasta la superficie. Para examinar esta posibilidad, se está exponiendo el cemento a la salmuera en el laboratorio y se van tomando muestras de cemento viejo de los pozos. Esta clase de fallo es menos probable en formaciones carbonatadas que en las areniscas; las primeras reducen la potencia destructora de la salmuera.

Los gobiernos mundiales deberán decidir pronto durante cuánto tiempo habrá que mantener el almacenamiento. La ética medioambiental y la economía tradicional dan diferentes respuestas. Si las autoridades se atuviesen a una estricta ética medioambiental que busque minimizar el impacto de las actividades actuales sobre las generaciones futuras, rehusarían la autorización de un proyecto de almacenamiento que sólo retuviese el dióxido de carbono doscientos años. Pero si se guían por las consideraciones económicas ordinarias, aprobarían el mismo proyecto aduciendo que de aquí a dos siglos, el mundo habrá inventado mejores modos de eliminar el dióxido de carbono.

Los años próximos, a medida que avancen las técnicas que hagan rentable la reducción de emisiones de CO_2 y progrese la autorización de puntos de almacenamiento, serán decisivos para los métodos de secuestro y almacenamiento del dióxido de carbono.

El autor

Robert H. Socolow, físico, es profesor de ingeniería mecánica y aeroespacial de la Universidad de Princeton.

Bibliografía complementaria

CONFINAMIENTO DE LOS GASES DE INVERNADERO. Howard Herzog, Baldur Eliasson y Olav Kaarstad en *Investigación y Ciencia*, n.º 283, págs. 66-73; abril, 2000.

PROSPECTS FOR CO_2 CAPTURE AND STORAGE. International Energy Agency, OECD/IEA, 2004.

STABILIZATION WEDGES: SOLVING THE CLIMATE PROBLEM FOR THE NEXT 50 YEARS WITH CURRENT TECHNOLOGIES. S. Pacala y R. Socolow en *Science*, vol. 305, págs. 968-972; 13 de agosto, 2004.

PROSPECTS FOR CARBON CAPTURE AND STORAGE TECHNOLOGIES. Soren Anderson y Richard Newell en *Annual Reviews of Environment and Resources*, vol. 29, págs. 109-142; 2004.

CARBON DIOXIDE CAPTURE FOR STORAGE IN DEEP GEOLOGICAL FORMATIONS — RESULTS FROM THE CO_2 CAPTURE PROJECT. Dos volúmenes. Dirigido por David C. Thomas (vol. 1) y Sally M. Benson (vol. 2). Elsevier, 2005.

Tortillas de maíz

Digestibilidad del almidón

El maíz —palabra de origen mesoamericano que significa "lo que sustenta la vida"— ha constituido durante largo tiempo moneda, símbolo religioso y alimento. Su domesticación influyó sobremanera en el desarrollo de las culturas americanas. Era tan importante en las sociedades mesoamericanas, que se dedicaban numerosas ceremonias a *Centéotl*, dios azteca del maíz, o a *Yum Kaak*, dios del maíz y la vegetación en la cultura maya. En la actualidad, el maíz se consume en distintas formas: desde la sémola (pasta de harina) para polenta y pan de maíz al maíz para rosetas y copos. En Venezuela y Colombia se descascara, desgermina y precuece para elaborar arepas (especie de pan); en México y Guatemala se le aplica un proceso de nixtamalización (cocción alcalina derivada de un antiguo método azteca) para producir tortillas, una de las principales fuentes de calorías, proteínas y calcio para los habitantes de dichos países.

1. Del maíz a la tortilla, toda una tradición mexicana.

Debido a la expansión del mercado de este alimento, se han desarrollado procesos industriales para la fabricación de harinas de maíz nixtamalizado y tortillas con gomas, con el objetivo de obtener productos que admitan mayor tiempo de almacenamiento. En México, la tortilla forma parte de la dieta de todos los estratos sociales con un consumo *per cápita* de 120 kg anuales; la producción asciende a unos 12 millones de toneladas anuales, de los cuales el 22,8 por ciento se elabora a partir de harina de maíz y el resto mediante masa de maíz nixtamalizado; en zonas rurales predomina el autoconsumo.

Los carbohidratos constituyen la mayor parte de la composición de las tortillas (entre el 50 y el 70 por ciento en base seca), siendo el almidón el principal. El almidón se estructura en gránulos, cuyo tamaño y forma dependen de la fuente. En nuestro laboratorio comparamos, mediante microscopía de luz polarizada, almidones de maíces sin nixtamalizar (ASN) con almidones de maíz nixtamalizado (AN). En ambos casos se observó birrefringencia (doble refracción que se produce cuando una radiación luminosa incide sobre un medio no isótropo): los gránulos mostraron una cruz de malta bien definida, indicativa del alto nivel de organización (radial) que adoptan las cadenas de amilosa y amilopectina, los polisacáridos de glucosa constituyentes del almidón. En cuanto al tamaño, en cambio, diferían: los AN mostraron gránulos mayores que los ASN, en razón del hinchamiento que sufren durante la nixtamalización. La cocción alcalina provoca el desprendimiento del pericarpio del grano. Durante el remojo se produce la difusión de agua hacia el endospermo. Conforme la temperatura disminuye, los gránulos de almidón sufren un proceso de recocido (*annealing*) que provoca un ligero reajuste en la estructura de la amilosa, pero no así en la amilopectina. (De haberse producido la gelatinización del almidón —que ocurre a temperaturas ligeramente superiores—, los gránulos hubieran perdido su estructura interna y, por tanto, no hubieran mostrado la cruz de malta al ser observados bajo luz polarizada.)

Siempre se había considerado que el almidón era digerido y absorbido por completo en el intestino delgado. Ahora sabemos, sin embargo, que una fracción del mismo es resistente a la digestión, pasa a través del intestino delgado y llega al grueso, donde es fermentado por los microorganismos del colon: se denomina almidón resistente (AR). La velocidad y grado de digestión del almidón, así como el contenido de AR, inciden en nuestras funciones fisiológicas y, por tanto, sobre la salud del consumidor.

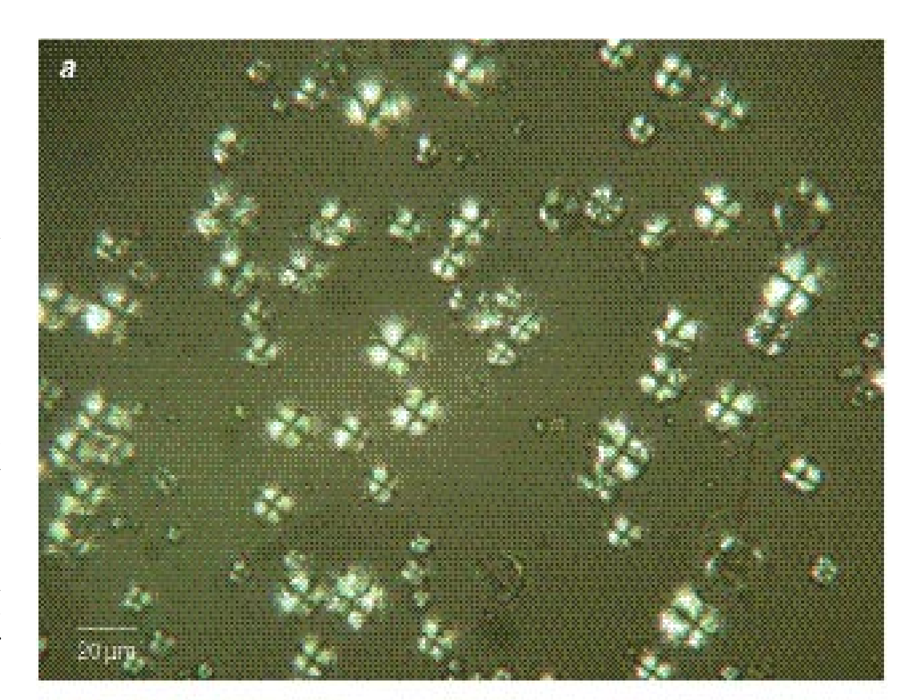
Diversos factores afectan a la velocidad de hidrólisis del almidón: el procesamiento del alimento, el tiempo y temperatura de almacenamiento, y su origen botánico. El almidón crudo resulta prácticamente indigerible; durante la cocción, se gelatiniza y se torna más digestible; cuando se enfría, una fracción del mismo se retrograda, haciéndose resistente a la digestión enzimática.

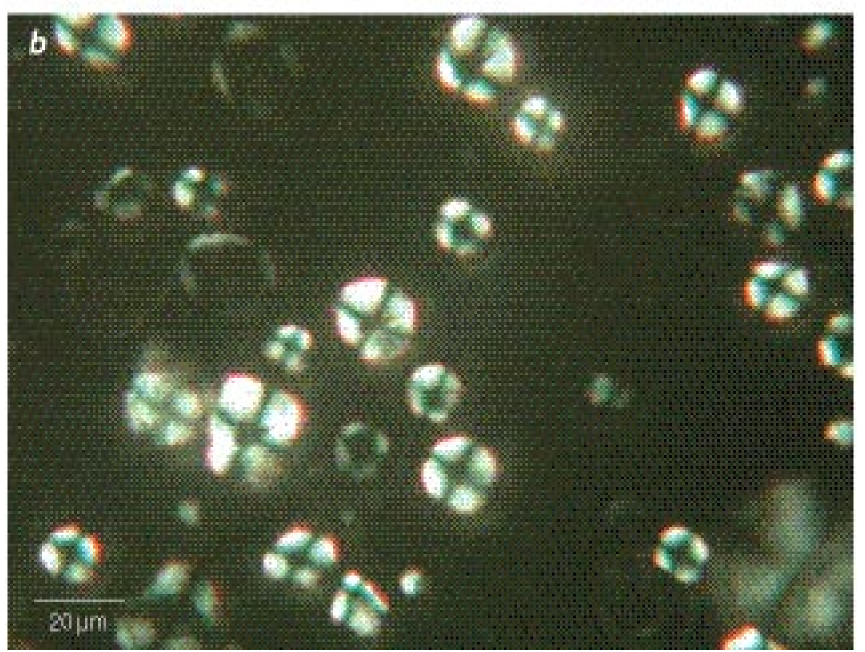
El AR contribuye a la prevención y el control de diversas enfermedades, por lo que las autoridades sanitarias recomiendan incluir en la dieta alimentos que lo contengan. El consumo de almidón se asocia a la liberación de grandes cantidades de glucosa en sangre y a un aumento de peso corporal. La proporción de almidón digerible en las tortillas puede ser menor que la del pan y otros productos elaborados con cereales; ello explica que, al cabo de una o varias horas, muchas de las tortillas elaboradas en México se endurezcan: esta transformación se debe a la retrogradación del almidón

y, por tanto, a la disminución de su digestibilidad.

Hemos llevado a cabo un estudio sobre la digestibilidad del almidón en tortillas elaboradas a partir de diferentes masas: masas preparadas mediante nixtamalización tradicional con maíz comercial, masas comerciales, masas elaboradas con harinas de maíz nixtamalizado comerciales y masas de maíz comercial preparadas en el laboratorio con la adición de hidrocoloides comerciales. Mediante una técnica *in vitro*, estudiamos el índice glucémico (IG, que informa de la velocidad de absorción de la glucosa en sangre y se correlaciona con el índice de hidrólisis del almidón) de las tortillas y su variación con el tiempo de almacenamiento bajo refrigeración. Nos interesaba estudiar la influencia del tiempo de almacenamiento porque, en la actualidad, los consumidores suelen comprar las tortillas en grandes cantidades y luego guardarlas en el refrigerador para su consumo en los días posteriores. Durante este tiempo, el almidón sigue un proceso de reorganización de sus componentes (retrogradación) que da lugar a una estructura muy rígida y compacta que no puede ser hidrolizada por las enzimas digestivas.

La tortilla elaborada con masa preparada en el laboratorio presentó el IG más elevado (108 por ciento); además, se mantuvo constante en el tiempo. El IG de la tortilla elaborada con masa comercial disminuyó con el tiempo de almacenamiento (del 103 al 96 por ciento). Esta disminución resultó aún mayor en el caso de la tortilla elaborada con la harina de maíz nixtamalizado (del 102 al 86 por ciento). La tortilla con hidrocoloides presentó los IG más bajos; tampoco cambiaron apreciablemente con el tiempo de almacenamiento (del 97 al 93 por ciento). Si bien los hidrocoloides inhibieron la retrogradación (el índice glucémico apenas cambió durante el almacenamiento en frío), el nivel de AR hallado en estas tortillas resultó mayor que en otras sin hidrocoloides; ello quizá se debe a que los polímeros que forman esos hidrocoloides en presencia de agua se agrupan en una malla o red que impide el acceso de las enzimas hasta el almidón y evita así que lo hidrolicen —es decir, si el almidón no se hidroliza no se debe a la retrogradación sino a la presencia de los hidrocoloides.





2. Gránulos de almidón aislados de maíz sin nixtamalizar (*a*) y de maíz nixtamalizado (*b*), observados a través de un microscopio de luz polarizada. La cruz de malta responde a la elevada organización estructural de las cadenas de amilosa y amilopectina.

A tenor de estos resultados, las personas con ciertos requerimientos nutricionales, calóricos o ambos (individuos con sobrepeso, diabéticos, deportistas, etc.), deberían elegir las tortillas cuyo método de procesamiento y almacenamiento fuera el más adecuado para sus necesidades dietéticas. Mediante la utilización de nuevas técnicas, se podría superar el prejuicio de que la tortilla engorda y así continuar consumiendo este económico y excelente alimento heredado de nuestros antepasados.

EDITH AGAMA ACEVEDO,
RODOLFO RENDÓN VILLALOBOS
y LUIS ARTURO BELLO PÉREZ
Centro de Desarrollo de Productos Bióticos del Instituto Politécnico Nacional, Yautepec-Jojutla, Morelos, México

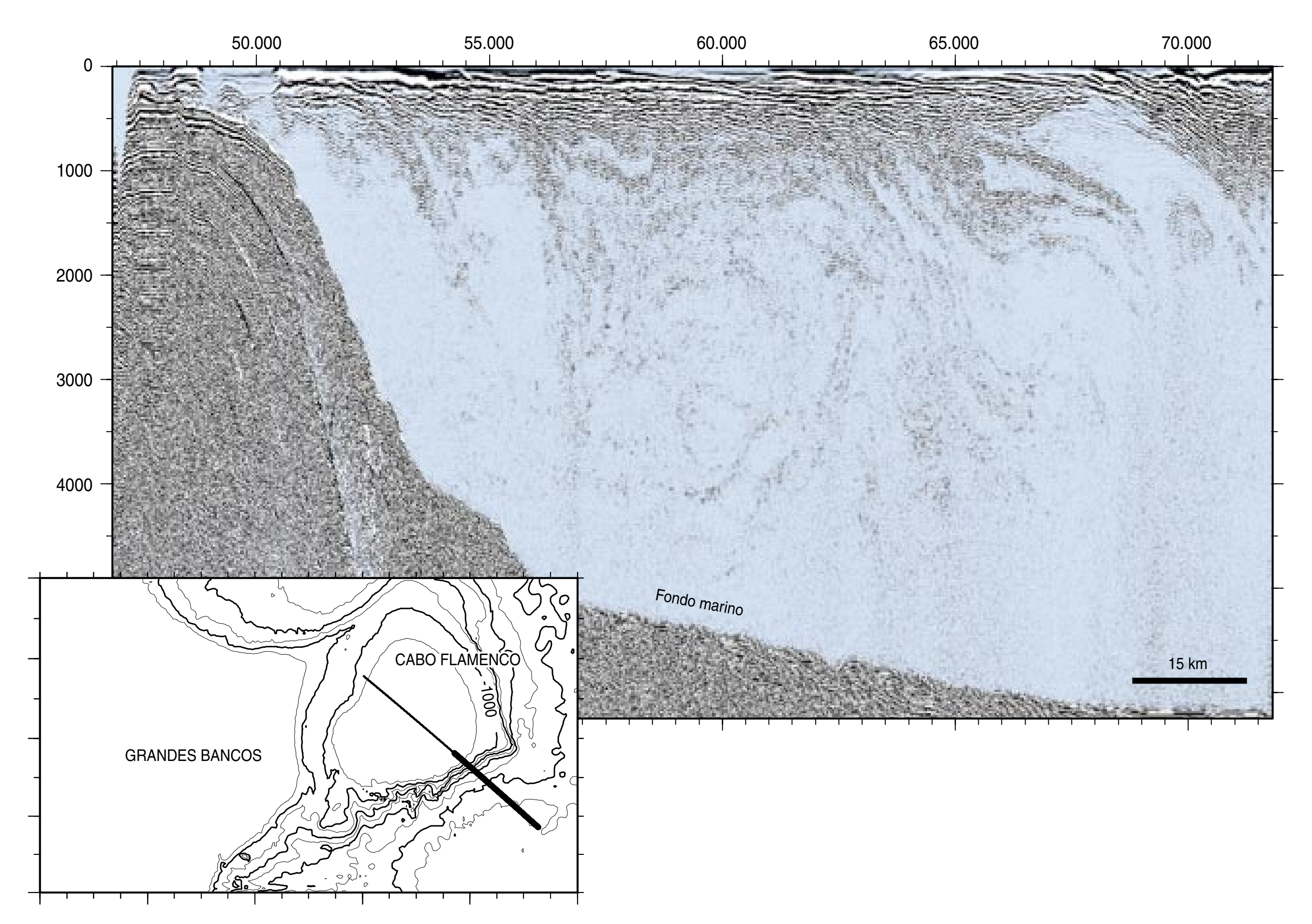
Oceanografía

Estructura fina termohalina

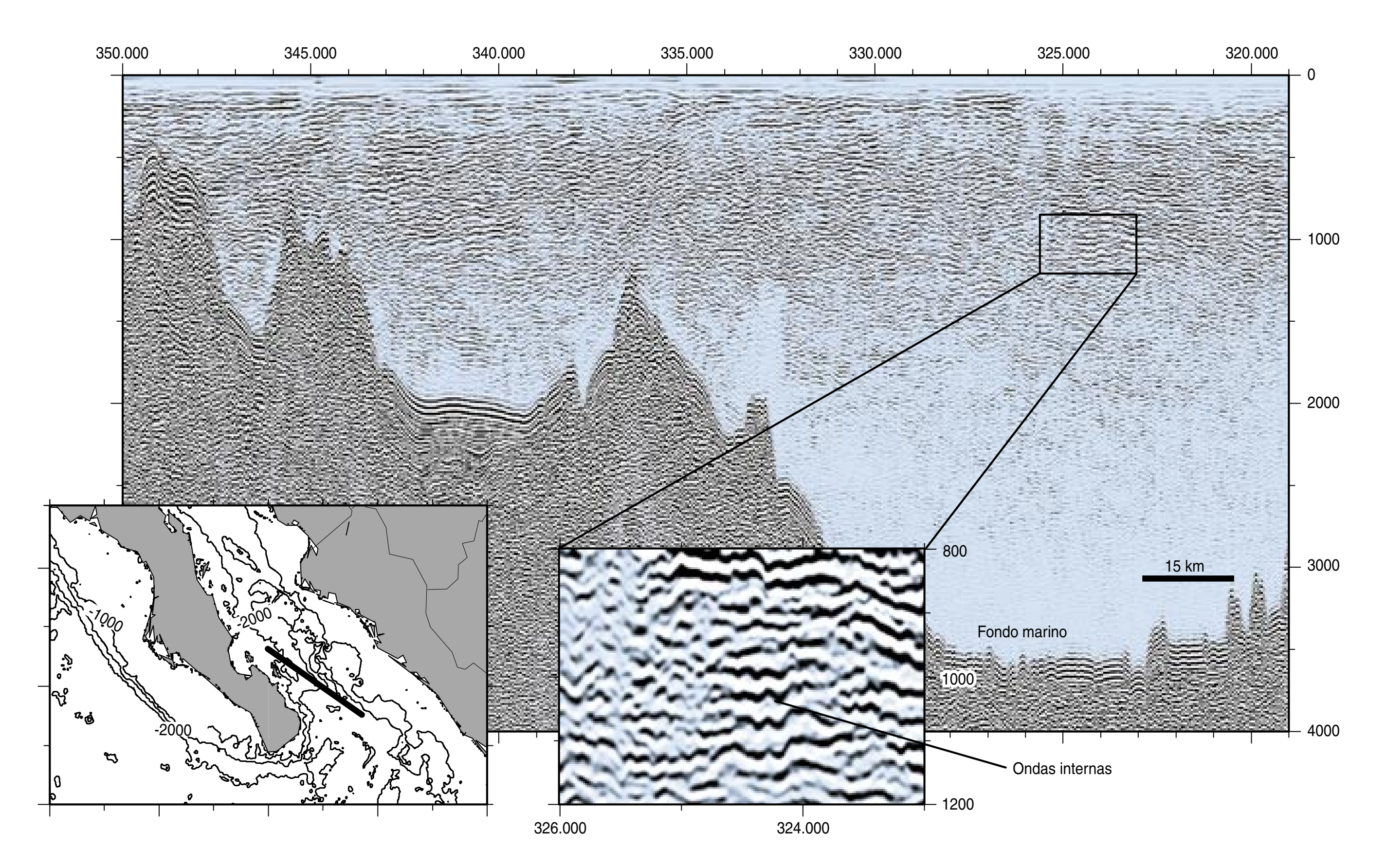
La exploración sísmica es una técnica que las empresas petrolíferas vienen aplicando desde hace decenios para explorar y analizar el interior de la corteza terrestre. El grupo formado por Steven Holbrook, Pedro Páramo y Scott Pearse, de la Universidad de Wyoming, junto con Raymond W. Schmitt, del Instituto Woods Hole de Oceanografía, la ha adaptado al estudio de la estructura de los océanos. Mediante la exploración sísmica se obtienen imágenes del interior de la Tierra que muestran los tipos de rocas en función de sus diferentes propiedades físicas. Ahora, con el nuevo procedimiento que hemos desarrollado en Wyoming, se obtienen espectaculares imágenes del océano en las que quedan registradas la temperatura y la salinidad —la estructura termohalina— de las diversas masas de agua que lo forman.

La aplicación a la investigación marina de la toma de imágenes mediante reflexión sísmica se basa en que la propagación por el agua del sonido, generado por unos cañones de aire a bordo de un barco, topa con un cambio súbito de la impedancia acústica, la magnitud que es a la propagación del sonido en un medio lo que la resistencia, o impedancia, al paso de la corriente eléctrica por un conductor. La señal sonora rebota entonces hacia la superficie, donde la variación queda registrada en un hidrófono. Ese cambio de impedancia acústica se produce cuando hay un pronunciado gradiente de temperatura que separa dos masas de agua. La diferencia de temperaturas va ligada, a su vez, a una salinidad diferente. El resultado final refleja con detalle la configuración, la "estructura termohalina fina", de esas dos propiedades en la lámina de agua que se extiende hasta el fondo bajo la trayectoria recta seguida por el buque que emite las señales acústicas.

Los reflejos acústicos presentan también unas ondulaciones que cabe interpretar como olas internas del mar. Mediante la caracterización de la estructura fina termohalina y de esas olas internas se puede estudiar la interacción de éstas con el fondo marino y localizar las áreas donde se mezclan masas de agua con distintas propiedades físicas. Quizá sea un paso muy importante en el conocimiento de las leyes climáticas del planeta.



1. Imágenes acústicas de la lámina de agua —un corte vertical del océano— en las proximidades del Banco de Terranova. El eje vertical representa los milisegundos que tarda el sonido en viajar, en su camino de ida a las profundidades y vuelta a la superficie, desde la fuente sonora hasta los hidrófonos. El eje horizontal representa las distancias horizontales en "puntos comunes de profundidad", o puntos donde se produce la reflexión del sonido, espaciados 6,25 m. El mapa muestra el lugar donde se adquirieron los datos de reflexión sísmica; las líneas de contorno indican la profundidad del agua en metros; el segmento negro, la trayectoria del barco emisor de las señales acústicas.



2. Imágenes acústicas de la lámina de agua en el golfo de California. En la zona ampliada se pueden apreciar olas internas.

Los investigadores de la Universidad de Wyoming hemos realizado observaciones sísmicas de la estructura fina termohalina en distintos océanos. En las proximidades del Gran Banco de Terranova se encuentra uno de los grandes frentes oceánicos del mundo, donde coinciden las aguas más calientes y saladas de la corriente del Golfo con las de la corriente del Labrador, más frías (*véase la figura 1*). Las imágenes acústicas de la lámina de agua muestran que en los primeros mil metros de profundidad las reflexiones sísmicas se forman por capas, que corresponden a "estratos" de agua con diferentes grados de salinidad y temperatura. Estas reflexiones desaparecen gradualmente con la profundidad, donde hay aguas acústicamente transparentes, es decir, sin cambios bruscos de la impedancia acústica. Estructuras similares se observan en el golfo de California (*véase la figura 2*).

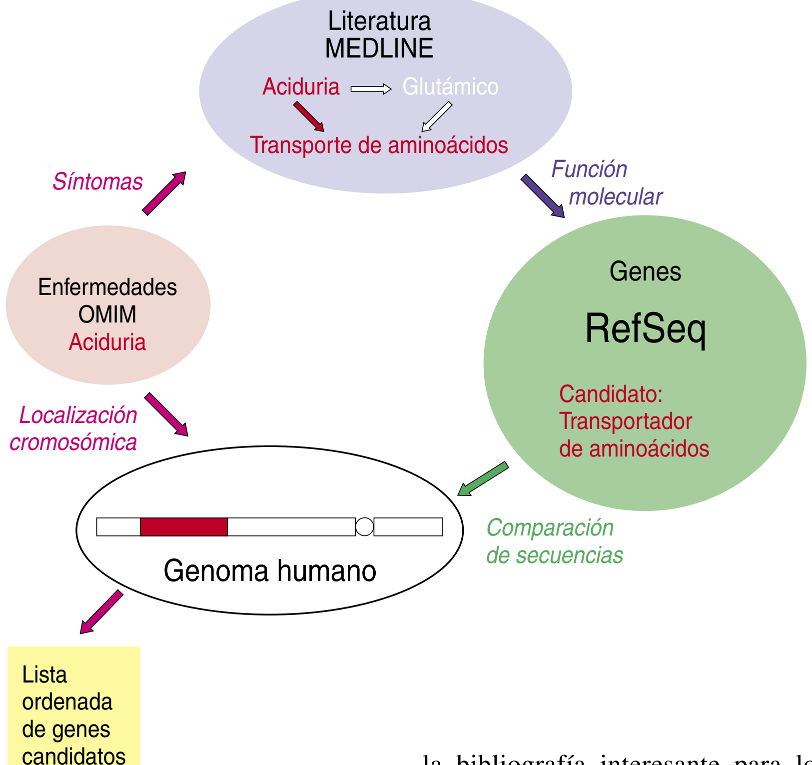
Hasta ahora, no se había reparado en las posibilidades de esas imágenes porque los geofísicos consideraban la lámina de agua marina un obstáculo para la exploración sísmica del subsuelo de los fondos oceánicos, en tanto que los oceanógrafos utilizan en sus exploraciones frecuencias mucho más altas (del orden de los kilohertz) para estudiar microestructuras o zooplancton superficiales, fenómenos distintos de los que interesan a los geólogos. Las capas que caracterizan la estructura fina termohalina tienen varias decenas de metros de grosor; gracias a esa configuración, se puede detectarla con la energía sísmica de entre 10 y 100 hertz que utilizan los barcos de exploración sísmica. Para hacerse una idea cabal, recuérdese que la velocidad del sonido en el agua de mar es del orden de 1500 metros por segundo; por lo tanto, entre las zonas de máxima compresión de una onda sonora que vibre unas decenas de veces por segundo hay decenas de metros de distancia).

PEDRO PÁRAMO
Depto. de Geología y Geofísica
Universidad de Wyoming

Genes y enfermedades hereditarias

Datos informáticos

Cuando un gen presenta una alteración anormal en su secuencia se dice que está mutado. La mutación del gen puede ocasionar que la proteína que codifica, contenga un error y no funcione correctamente. Tal situación puede originar una enfermedad que es hereditaria, dado que el gen se transmite a la descendencia. Enfermedades tan graves y frecuentes como el Alzheimer, la diabetes o el cáncer responden a este fenómeno. Otras enfermedades hereditarias tienen una incidencia bajísima en la población, pero son muy graves. Por último, muchas de ellas se corresponden con trastornos más benignos. Sin embargo, su estudio reviste también importancia biomédica debido a que, al dilucidarlas, se pueden desentrañar mecanismos moleculares aún desconocidos.



Para determinar cuál es el gen responsable de una enfermedad se comienza por rastrearlo en el genoma humano a partir de los datos obtenidos de algunas familias afectadas. De ese estudio resulta una acotación más o menos extensa de la alteración en el genoma. La localización cromosómica así determinada contiene un número variable de genes conocidos (funcionalmente caracterizados y cartografiados en la región) más un número indeterminado de genes sin caracterizar. En la mayoría de los casos, el investigador debe enfrentarse luego al análisis de varios cientos de genes candidatos, muchos de ellos de función desconocida.

Hace algunos años, en diciembre de 1995, se creó un banco de datos dedicado a las enfermedades hereditarias llamado OMIM (*On Line Mendelian Inheritance in Man*). En OMIM se depositan una descripción completa de la enfermedad, la información relativa a su localización cromosómica y la bibliografía correspondiente. Existen además varias bases de datos dedicadas a los genes, por ejemplo RefSeq, que contienen sus secuencias y descripciones de sus funciones, así mismo documentadas bibliográficamente. Por otra parte, la bibliografía interesante para los biólogos se encuentra depositada en MEDLINE, base de datos que contiene hasta la fecha más de once millones de referencias a trabajos científicos.

Uno de los desarrollos más recientes de la bioinformática es la "minería de datos". Consiste en utilizar la ingente cantidad de información depositada en las bases de datos para extraer conocimiento. La aplicación de técnicas de minería de datos a la biología molecular constituye una de las líneas de investigación de nuestro grupo del Laboratorio Europeo de Biología Molecular en Heidelberg.

En este contexto, hemos puesto a punto un método destinado a facilitar el estudio de las enfermedades hereditarias que se han conseguido localizar en el genoma, pero cuyo gen responsable no se ha identificado todavía. Su número sobrepasa los seis centenares. El sistema se sirve de la información disponible en las distintas bases de datos mencionadas (enfermedades, genes y bibliografía) para proporcionar automáticamente una lista de genes candidatos a la enfermedad, ordenados según sean más o menos plausibles. El carácter racional y exhaustivo del resultado permite un mejor abordaje del problema al experimentador que busca el gen responsable de una enfermedad.

En términos prácticos, el problema se reduce a relacionar un fenotipo (la enfermedad) con una función molecular. Nosotros intentamos relacionarlos a través de los conceptos que los describen. Si dos conceptos aparecen mencionados juntos con mucha frecuencia en la bibliografía científica, damos por supuesto que guardan una relación muy estrecha. Aunque no abundan los trabajos que relacionen directamente fenotipos con funciones moleculares, la fenomenología que comparten el fenotipo y el genotipo la constituyen los procesos químicos. Por esta razón, utilizamos los conceptos relativos a compuestos químicos.

Primero relacionamos los fenotipos con compuestos químicos. Luego relacionamos los compuestos químicos con la función molecular de los genes. Mediante un formalismo basado en la teoría de conjuntos borrosos, unificamos ambas relaciones para deducir una conexión directa entre los síntomas de una enfermedad y la función molecular que, de estar alterada, los provocaría (*véase la figura*). De esta manera pueden deducirse incluso relaciones que no se presentan explícitamente en la bibliografía.

Una vez obtenida una lista preliminar de los posibles candidatos, el conocimiento de la secuencia completa del genoma humano nos permite ir un paso más allá. Si comparamos la secuencia de un gen candidato con la secuencia del genoma en la localización cromosómica de la enfermedad correspondiente y encontramos que son muy similares, presumimos que allí hay un gen que tiene muchas posibilidades de ser el causante de la enfermedad (*véase la figura*). Hemos completado este análisis para más de 450 enfermedades y organizado los resultados en una base de datos llamada G2D (del inglés *Genes to Diseases*). En estos momentos estamos perfeccionando el método y produciendo una nueva versión con los datos actualizados de todas las bases de datos, así como el último ensamblaje del genoma humano.

CAROLINA PÉREZ IRATXETA
Laboratorio Europeo
de Biología Molecular,
Heidelberg

Estructura del bosque europeo caducifolio

El papel de los refugios glaciares

Un verano tan cálido como el del año 2003 nos lleva a cuestionarnos si nos hallamos en el umbral de un cambio climático a gran escala o si se trata de un año caluroso, que responde a los ciclos aleatorios del clima. Nos falta perspectiva histórica para determinarlo. De lo que no parece haber duda es de que estamos asistiendo a un calentamiento global de la biosfera.

Los cambios climáticos no han sido algo inusual en la historia de la Tierra. Las fuertes oscilaciones del clima entre épocas glaciares y períodos interglaciares cálidos han servido para poder hablar de era cuaternaria, la nuestra. En el Cuaternario apareció el hombre sobre la Tierra, que ha dejado sentir su acción sobre el medio ambiente, a través de la deforestación y otros efectos. Ese intervalo temporal, de dos millones de años, dura bastante menos que los períodos geológicos anteriores. Por eso, algunos prefieren llamarlo Pleistoceno ("el más reciente").

No existe acuerdo sobre el comienzo del Cuaternario vinculado a la sucesión de ciclos de hielo y deshielo. En cualquier caso, durante el Pleistoceno el hielo cubrió varias veces el hemisferio norte. Ha habido cuatro grandes secuencias de avance de los hielos: Günz, Mindel, Riss y Würm. Pero un período glaciar no es un tiempo frío uniforme; se producen interrupciones cálidas. Dicho de otro modo, el modelo esquemático de las cuatro glaciaciones no recoge las fluctuaciones climáticas que tuvieron lugar en el Pleistoceno y que se estiman en una veintena de alternancias. Ahora vivimos en el período interglacial Holoceno.

Fluctuaciones de los bosques

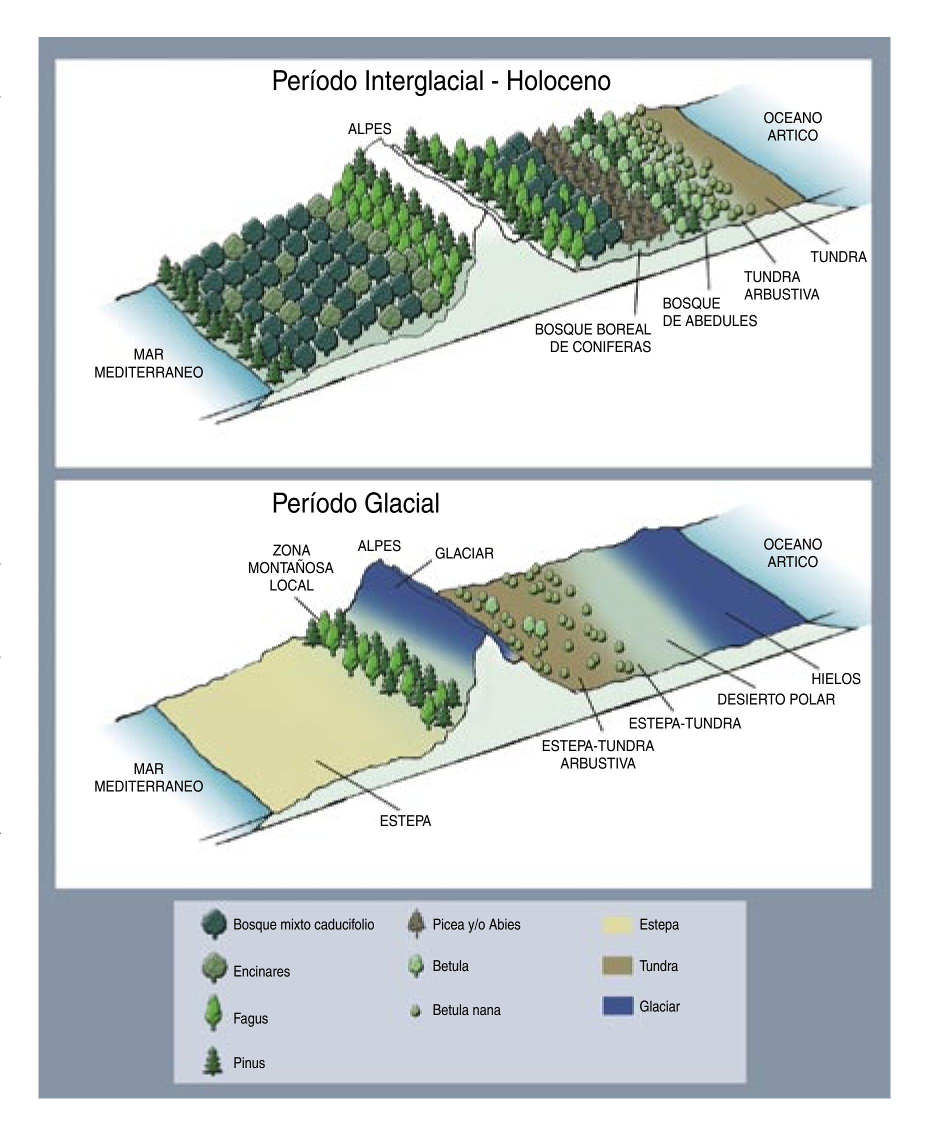
Estas sucesivas expansiones de hielos septentrionales perturbaron la vegetación y provocaron drásticas respuestas bióticas. La principal fue la migración. Puesto que las plantas dependen del movimiento de sus frutos y semillas para migrar y expandirse en nuevas áreas, si los cambios ambientales proceden con suma celeridad no queda tiempo para la emigración y evolución: se extinguen poblaciones vegetales enteras. Esto es especialmente válido para organismos integrados en sistemas complejos, como las especies que constituyen los bosques.

Las formaciones boscosas de los períodos interglaciares se caracterizaron por su amplia diversidad. Según nos revela el registro fósil, había robles, fresnos, alisos, olmos, hayas, arces, tilos, avellanos y hasta 50 especies diferentes de frondosas. En el período frío subsiguiente, zonas extensas de estos bosques templados quedaron cubiertas por hielo o por una vegetación boreal o de tundra. En los períodos de calentamiento posteriores, la recolonización empezará con especies que sobrevivieron acantonadas en refugios adecuados.

Nunca sabremos por qué unas especies sucumbieron y otras se impusieron con asombrosa rapidez. Detrás de esta ingente tarea de supervivencia hubo complejas estrategias de colonización con patrones propios según la especie, como se ha evidenciado en el caso de los robles, que aparecieron hace 10 millones de años y que, después de superar las sucesivas alternancias climáticas del Cuaternario, dominan hoy el bosque europeo.

Los refugios glaciares

Durante las épocas gélidas, las plantas se acantonaron en refugios orientados al sur, cercanos al mar y exentos de la presión de los hielos. Hablamos de zonas bajas de las mon-



1. Vegetación de Europa en una sección norte-sur. Se muestran los diferentes biomas de los períodos glacial e interglacial.

tañas y, sobre todo, de las regiones meridionales del hemisferio norte.

Los procesos de migración hacia el norte se hallaron condicionados por las cadenas montañosas situadas en latitudes inferiores del hemisferio septentrional: los Alpes, el Himalaya o los Andes; éstos se convirtieron, por sus grandes altitudes, en centros independientes de glaciación. Desempeñaron, además, funciones decisivas en la nueva distribución de las especies, unas veces por constituir barreras que se oponían a la expansión, otras por ofrecer mecanismos de conservación para las especies capaces de ordenar sus áreas de distribución en la dirección de la cadena montañosa.

En Norteamérica, donde las cordilleras atravesaban el continente en la dirección de los meridianos, muchas especies migraron hacia el sur para refugiarse en Centroamérica. Gracias a esa estrategia, especies que desaparecieron del Viejo Continente, como el falso tulipero (*Liriodendron*), sobrevivieron en América.

Sin embargo, las cordilleras que corren en el sentido de los paralelos constituyen imponentes barreras físicas que determinan la extinción de muchas especies. Así sucedió en Europa, donde la presencia de sistemas montañosos transversales, junto al mar Mediterráneo —que actuó como factor de aislamiento—, dificultó la migración de especies vegetales que, desde los ambientes fríos, buscaban biotopos más favorables. De un modo especial, durante los picos de las glaciaciones, la barrera montañosa de los Alpes obligó al aislamiento y la extinción local de comunidades vegetales enteras. Ahí reside la razón de la menor riqueza florística que presenta Europa.

Al sur de los Alpes persistieron tres grandes zonas de refugio para árboles y arbustos. Estos refugios glaciares por excelencia, a causa del efecto atenuador del mar, fueron las tres penínsulas de la región mediterránea: la península Ibérica, la península Itálica y los Balcanes. Espacios únicos, se convirtieron en puntos de partida de la colonización de Europa que siguió a la última glaciación.

Reconstrucción del bosque europeo

El último período glacial abarcó desde 115.000 años antes de la actualidad (a.a.) hasta 10.000 años a.a. Alcanzó su cenit hace unos 18.000 años, época en la que se redujo la expansión de los árboles y arbustos del bosque europeo, cuya recuperación se inició hace unos 8000 años, coincidiendo con los valores más altos de pluviosidad.

Para poner de manifiesto las estrategias de colonización utilizadas por las especies podemos seguir varios métodos. Los dos más socorridos son el enfoque genético y el paleobotánico. El proyecto europeo CYTOFOR, desarrollado por nueve equipos de investigación de seis países, ha tratado de reconstruir la historia reciente de los 22 principales árboles y arbustos de nuestro bosque templado. Las especies se colectaron en 25 bosques repartidos por toda Europa.

En algunas turberas los episodios cálidos quedaron registrados en los depósitos de polen. El material fósil interglacial refleja el cambio progresivo, desde condiciones árticas y virtualmente abióticas hasta el bosque mixto de frondosas, pasando por una vegetación subártica, la tundra, y una vegetación boreal, constituida por bosques de abedules y de pinos.

En el marco del proyecto CYTOFOR, se ha estudiado más del 50 % de las secuencias palinológicas disponibles (unas 1000), para identificar los refugios y las rutas seguidas por el proceso colonizador. Pero los estudios palinológicos se ciñen a las especies que generan mucho polen, es decir, las que utilizan el viento como agente polinizador. Además, el polen fósil adolece de su limitada resolución taxonómica; no permite llegar a la identificación por debajo del nivel de género.

En los últimos diez años ha adquirido interés la información encerrada en la molécula de ADN de cloroplastos, para conocer la distribución filogeográfica de las especies vegetales. A diferencia del ADN nuclear, esta molécula persistente en el curso evolutivo y de un tamaño pequeño se transmite sólo por uno de los progenitores, normalmente por vía materna en las angiospermas.

Los marcadores moleculares basados en el ADN de cloroplastos aportan claves para seguir los cambios operados en relación con los refugios glaciares, las rutas de dispersión y la distribución actual de las especies. Estos marcadores genéticos siempre están disponibles; no así el polen fósil. Con todo, no permiten comprender la historia de la vegetación en un contexto temporal e identificar los factores que conducen a cambios en su distribución.

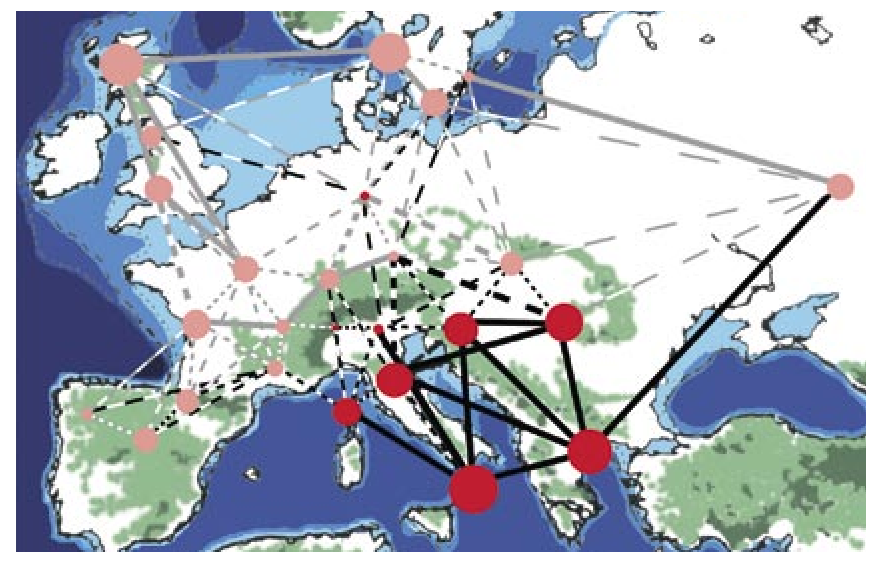
Para analizar el polimorfismo de la molécula del ADN de cloroplastos suele recurrirse a la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa asociada a la detección de polimorfismos en la longitud de los fragmentos generados posteriormente mediante enzimas de restricción (PCR-RFLP). Cada patrón detectado entre los individuos de una especie constituye una variante genética, un haplotipo. En nuestro estudio se obtuvieron un mínimo de cuatro haplotipos diferentes en el caso del carpe (*Carpinus betulus*) y un máximo de 50 haplotipos para el endrino (*Prunus spinosa*).

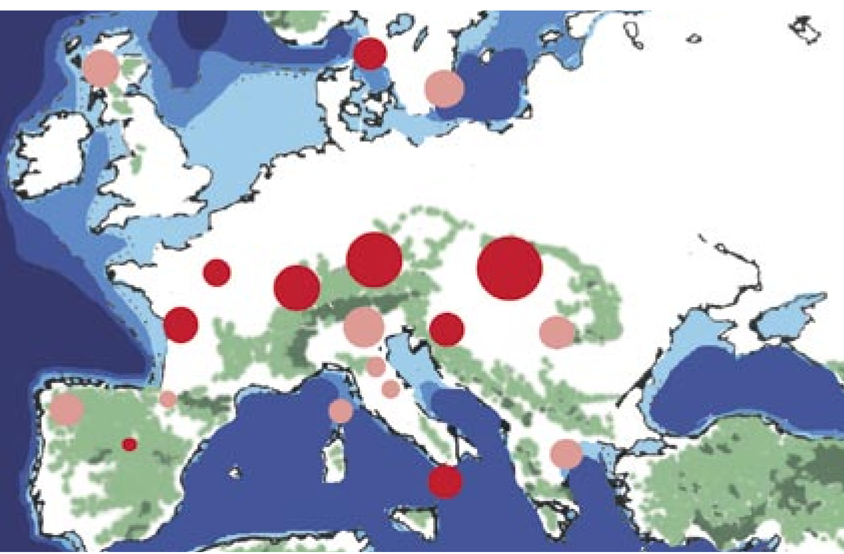
La diversidad genética así obtenida se evaluó a través de distintos índices, entre ellos el G_{ST}, que expresa en porcentaje la diferenciación genética encontrada entre las poblaciones de una especie y refleja la capacidad de dispersión de la misma. Los valores más bajos de G_{ST} se obtuvieron en el sauce y el olmo (9 % y 11 %, respectivamente), lo que indica bajos niveles de diferenciación entre las poblaciones debido a la existencia de un importante flujo de genes entre ellas, a través de sus semillas ligeras y dispersadas por el viento.

Las especies con semillas grandes y alimenticias, dispersadas a través de animales (hayucos de *Fagus*, avellanas de *Coryllus* o bellotas de los robles), tienen valores de G_{ST} superiores a la media (74 %, 84 % y 89 %, respectivamente). Estos altos niveles de diferenciación entre las poblaciones indican un mayor aislamiento entre ellas, en correspondencia con el menor movimiento de sus pesadas semillas.

"Puntos calientes"

En fitogeografía se denominan "puntos calientes" las zonas de máxima biodiversidad. Ocupan un 2 % de la superficie terrestre, porcentaje que incluye los refugios glaciares. Se supone que, tras la última glaciación, algunas de las poblaciones que sobrevivieron se pudieron expandir, mientras otras quedaron aisladas, se extinguieron o persistieron variando la altitud.





2. Divergencia genética de cada uno de los 25 bosques estudiados en el proyecto CYTOFOR (el diámetro del círculo es proporcional al valor obtenido). El nivel de divergencia en relación a los cinco bosques más próximos se representa con líneas (negra, alto; de puntos, medio; gris, bajo). Los niveles del mar en el pasado (21.000, 15.000 y 12.000 años antes de la actualidad) se indican por sucesivos tonos de azul (*arriba*). Número medio de haplotipos encontrados por bosque. Se pone de manifiesto la máxima diversidad al norte de las tres penínsulas europeas (*abajo*).

Se establecieron dos predicciones: las especies que quedaron aisladas deberían ser muy divergentes entre sí; la diversidad genética intraespecífica debería declinar a medida que nos alejáramos de los refugios, como una consecuencia obligada por los sucesivos episodios fundacionales durante la colonización postglacial.

En cuanto a la primera predicción, se encontró que la mayoría de las especies estudiadas presentaban poblaciones genéticamente divergentes en la región mediterránea. Tales especies, que representan una fracción muy significativa de la flora leñosa del norte de Europa, se ajustaron a lo esperado: en las poblaciones del sur y del centro de Italia, en Córcega y en la península de los Balcanes ofrecían los valores más altos de divergencia por acumulación de haplotipos únicos y peculiares. Pero esa situación pudo también detectarse en bosques situados al norte de Italia, en Croacia y en Rumania, es decir, en latitudes bastante altas.

Los tres bosques estudiados en la península Ibérica presentaron valores bajos de divergencia y diversidad en comparación con las otras dos penínsulas mediterráneas. Esa disparidad puede deberse a que los Pirineos han actuado como una barrera menos eficaz que los Alpes después de la última glaciación y a que en el último período postglacial la bajada del nivel del mar creó un puente que conectaba el norte de España con Francia, Bretaña e Irlanda, por donde robles y fresnos pudieron expandirse fácilmente. Otras especies, como las hayas y los arces, llegaron a España por el norte, desde los refugios situados en Italia o en los Balcanes, lo que pudo igualmente significar menor divergencia en las poblaciones del norte ibérico.

De acuerdo con la segunda predicción, habría que esperar máximos valores de diversidad genética en los refugios y una disminución gradual con el alejamiento progresivo de los mismos. Pero los resultados obtenidos no se ajustaron a lo esperado. La diversidad genética intrapoblacional fue mayor al norte de las principales cadenas montañosas, concretamente, en la zona central de Francia, en el sur de Alemania y en Eslovaquia; mientras que las poblaciones del sur mostraron valores inferiores a la media.

¿A qué se debe la discrepancia? Pudiera explicarse por la concurrencia de distintas rutas de colonización en un mismo lugar y, con ello, la mezcla consecuente de distintos haplotipos, máxime cuando los refugios glaciares de donde partía la colonización no estaban muy alejados. Se han avanzado nuevos modelos teóricos de colonización que aplicados a estas situaciones, revelan que la diversidad genética se mantiene durante la colonización más de lo que se suponía, pero no señalan ningún incremento de la misma.

El trabajo realizado dentro del proyecto CYTOFOR ha confirmado la importancia de los refugios glaciares y ha permitido adquirir nuevos datos relacionados con las consecuencias genéticas que la historia reciente ha tenido sobre las especies forestales.

ITZIAR AGUINAGALDE
JUAN PEDRO MARTÍN CLEMENTE
E.T.S.I. Agrónomos, Madrid
REMY PETIT
Institut Nacional de la Recherche Agronomica, Station de Recherches Forestières, Burdeos

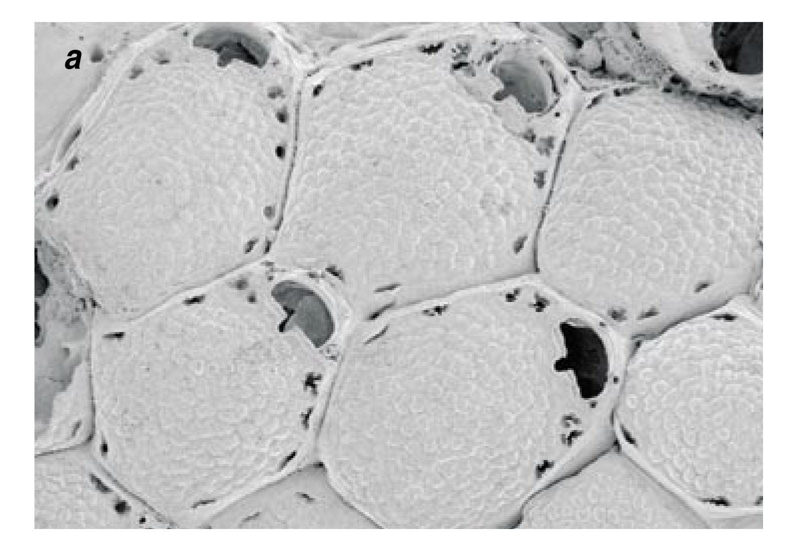
Josep M.ª Gili, M. Zabala y J. Gutt

Vida incrustada

La vida en los océanos no tiene límites. Cualquier entorno, por complejo, complicado o selectivo que nos parezca, puede ofrecer las condiciones apropiadas para el desarrollo de un organismo. La superficie de las rocas o bloques depositados en el lecho marino constituye un ejemplo de este fenómeno. Se trata de un hábitat selectivo. Las corrientes marinas arrastran sedimentos, cuyos granos interaccionan con la roca dificultando a priori la colonización de su superficie. Pero a pesar de este efecto abrasivo, algunos organismos han desarrollado la capacidad de adherirse a las rocas y sacar provecho de tan inhóspito hábitat.

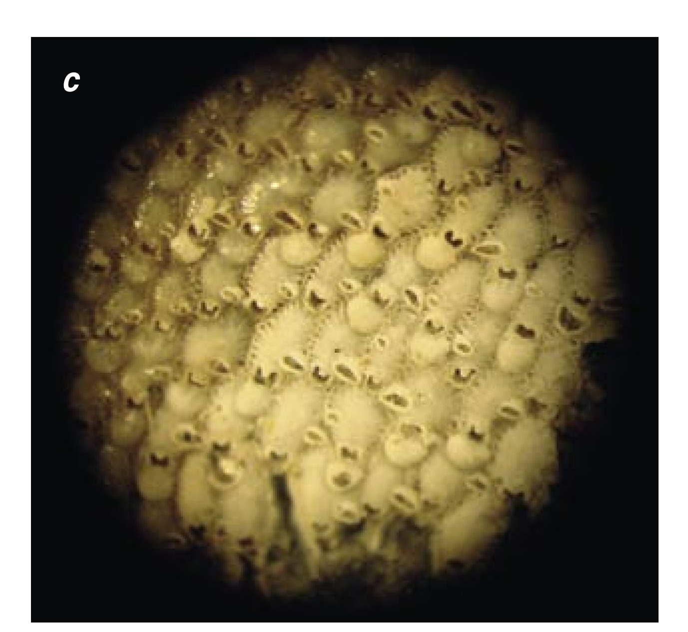
Pensemos en los briozoos. Estos animales coloniales se incrustan en la superficie de los bloques rocosos. Las colonias constan de pequeños individuos, o zooides, dotados de un exoesqueleto calcáreo que les confiere protección frente al tránsito e impacto de los granos de sedimento. La cubierta es como un sarcófago del que no pueden escapar; en su interior se encuentra un organismo con una estructura filtradora que captura las partículas que se desplazan con las corrientes. Por tanto, si bien podría resultar perjudicial, el arrastre de sedimentos impulsado por las corrientes constituye también su fuente de alimento. Los distintos zooides de cada colonia se comunican entre ellos por canales o agujeros en la cubierta calcárea. También en los bosques terrestres hallamos organismos que medran incrustados en las rocas: los líquenes.

1. Bloque cubierto por especies incrustantes. Predominan los briozoos, que forman manchas amarillentas o blanquecinas; una vez instalados, facilitan el asentamiento de esponjas, gorgonias y otros organismos.

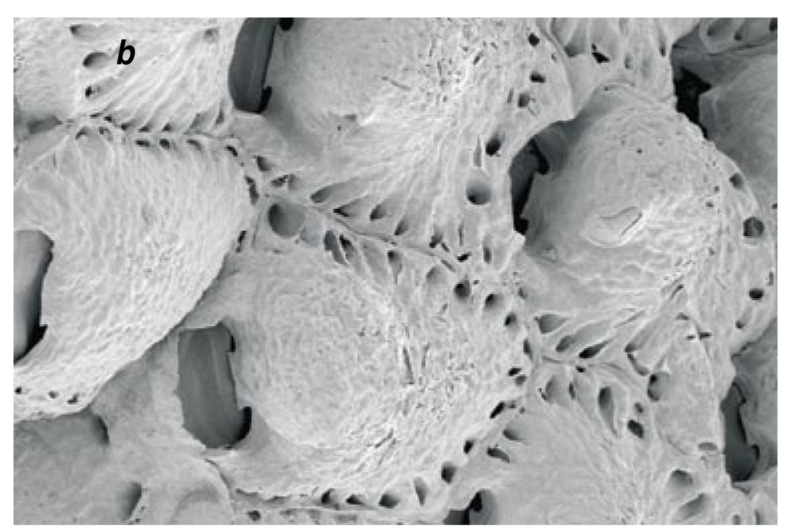


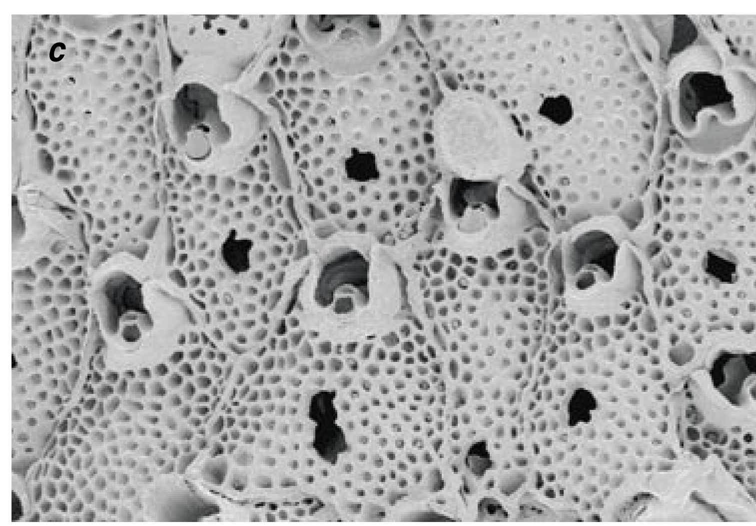


2. Colonia de briozoos en la superficie de una roca recogida en el Mar de Weddell (Antártida), observada a simple vista (*a*), a través de la lupa (*b*) y a través del microscopio (*c*).



3. Microscopía electrónica de barrido de tres especies de briozoos que forman colonias incrustantes sobre bloques de rocas en las comunidades antárticas: *Lacerna watersi* (*a*), *Rhamphosmittina bassleri* (*b*) y *Smittia excertaviculata* (*c*).







1. *BRACHIOSAURUS*, uno de los dinosaurios de mayor tamaño, adquiría la talla adulta antes de los 20 años. Mucho menos tardaba *Microraptor*, del porte de una gallina. La edad de animales extinguidos se infiere a partir de las líneas de crecimiento anuales presentes en sus huesos y de las tasas de crecimiento del tejido óseo de animales modernos.

MARK HALLETT



Así crecían los dinosaurios

De la estructura de los huesos de los dinosaurios se infieren la edad y la tasa de crecimiento de aquellos gigantes

John R. Horner, Kevin Padian
y Armand de Ricqlès

La mayoría de nosotros podríamos pasear cómodamente, sin tener que agachar la cabeza, bajo la quijada de un *Tyrannosaurus rex* o bajo la caja torácica de un *Brachiosaurus* montados en un museo. La talla de *T. rex* no desdice de la alcanzada por el mayor elefante africano conocido. *Brachiosaurus*, lo mismo que otros grandes saurópodos, era mucho mayor que cualquier animal terrestre vivo en la actualidad. ¿En qué mecanismo se fundaba el gigantismo de los dinosaurios? ¿Cuánto tardaban en adquirir tales proporciones de adulto? ¿Cuántos años vivían? ¿Podemos inferir otros aspectos de su biología a partir de su sistema de crecimiento?

Hasta hace poco, no disponíamos de patrón alguno para medir la edad de los dinosaurios. En razón de su condición reptiliana, se asumía que debieron de desarrollarse según las pautas expresadas por los reptiles modernos; con notable lentitud, pues. Se aceptaba que los dinosaurios de porte imponente habían llegado a una edad avanzada, pero nadie sabía cuán avanzada, porque no se conoce ningún reptil vivo que alcance un tamaño siquiera parecido al de un dinosaurio.

Esta tesis hunde sus raíces en el trabajo de Richard Owen. Cuando, en 1842, dio nombre a los dinosaurios, el paleontólogo inglés encasilló a un grupo reducido y casi ignoto de reptiles insólitos y gigantes. Supuso que, amén de enormes, eran terrestres; diferían, pues, de ictiosaurios y plesiosaurios, marinos, que se conocían desde principios del siglo XIX. Poseían cinco vértebras conectadas a las caderas; dos tienen los reptiles actuales. Presentaban sus extremidades bajo el cuerpo, no extendidas hacia los lados.

Pese a tales diferencias, continuaba Owen, los rasgos anatómicos de sus huesos (forma, articulaciones e inserciones musculares) señalaban que se trataba de reptiles. De ahí deducía que su fisiología debía ser, también, reptiliana; con otras palabras, desarrollarían un metabolismo lento, de animales de "sangre fría". Esta imagen perduró. Hasta bien entrados los años sesenta de la centuria siguiente, los dinosaurios aparecían como unos gigantes de movimiento pausado y pesado, que se habrían desarrollado lentamente hasta alcanzar un gran tamaño en el marco de un invernadero benigno, del que fueron señores y dueños.

Sabemos hoy que las claves sobre la edad de los dinosaurios y, por tanto, sobre su crecimiento, se hallaban escondidas en sus huesos. Aunque los paleontólogos conocían desde hacía muchos años que los huesos de los dinosaurios revelaban líneas de crecimiento —similares a los anillos de crecimiento de los árboles—, hasta la segunda mitad del siglo XX no empezaron a recurrir a estas y otras estructuras óseas para ahondar en el desarrollo de estos animales extintos.

Los huesos: registros del crecimiento

Lo mismo que los anillos de crecimiento de los árboles, las líneas de los huesos de los dinosaurios tienen una periodicidad anual, pero su interpretación entraña mayor complejidad. Un árbol contiene casi todo el registro de su crecimiento en el tronco. En una sección del mismo, pueden contarse los anillos de uno en uno, del centro a la corteza. Sólo la capa externa produce madera nueva; el interior se halla seco. El interior de un hueso, en cambio, es pura actividad: los osteoclastos, células destructoras de tejido óseo, vacían la parte central mediante un proceso que permite el reciclaje de los nutrientes. Este centro, o cavidad de la médula (tuétano), constituye asimismo la fábrica que produce los glóbulos rojos de la sangre.

El hueso entero se desarrolla y cambia sin cesar en el curso de la vida. Conforme va creciendo, se va depositando tejido nuevo en su periferia; en los huesos largos el crecimiento se da asimismo en las epífisis. Mientras tanto, en la cavidad del tuétano, los osteoclastos corroen el hueso depositado en las primeras etapas de la vida; otras células fabrican tejido óseo secundario a lo largo del perímetro de la cavidad o invaden la corteza (capa externa) del hueso que queda, para remodelarla.

Se trata de una actividad ósea interna que suele desgastar el registro de crecimiento durante las primeras fases de la vida del organismo. Por esta razón, raras veces podremos deducir el registro completo del desarrollo de un dinosaurio a partir del recuento de los anillos de uno de sus huesos. Existen varias formas de reconstruir la historia precoz del hueso. Así, la que estriba en rellenar el registro perdido con huesos de individuos más jóvenes (que contienen todavía los tejidos que en los huesos más viejos se han erosionado ya). Mediante el examen de estos tejidos y el recuento de las líneas de crecimiento, podemos estimar el número de años que se borraron en el registro de los huesos más viejos. Si no se dispone de juveniles, se "retrocalcula" el número de líneas de crecimiento perdidas a partir de las distancias entre las que sí se han conservado.

En fecha reciente, aplicamos este retrocálculo en *Tyrannosaurus rex*. El Museo de las Rocosas en la Universidad estatal de Montana posee una docena de ejemplares de este carnívoro gigante. Siete de ellos conservan aún bastante bien algunos huesos de las extremidades posteriores, de los que rebanamos finos cortes para examinarlos con un microscopio.

Las preparaciones microscópicas de las patas de *T. rex* revelaron sólo entre cuatro y ocho líneas de crecimiento claras. Otras, cerca del centro, aparecieron enmascaradas por el cre-

Resumen/Gigantes de crecimiento rápido

- Hasta hace poco, no se conocía ningún patrón para medir la edad de los dinosaurios y saber, por tanto, su ritmo de crecimiento
- La clave se hallaba, sin embargo, en los huesos. Muchos de ellos dibujan líneas de crecimiento, similares a los anillos de los árboles.
- De estas líneas y otras estructuras óseas se infiere que los dinosaurios llegaban al tamaño adulto con suma prontitud. Este patrón de crecimiento guarda mayor semejanza con el de los mamíferos y aves que con el de los reptiles, mucho más lento.
- De acuerdo con este célere crecimiento, tendrían una elevada tasa metabólica, más cercana a la de los animales de sangre caliente que a la de los reptiles, de sangre fría.

cimiento de tejido óseo secundario. La cavidad de la médula presentaba una luz notable: dos tercios de la corteza ósea original se habían corroído. Observamos también que, en algunos individuos, el espacio entre las líneas de crecimiento se reducía bruscamente hacia el exterior del hueso. Este patrón lo habíamos visto antes en *Maiasaura*, un dinosaurio herbívoro de pico de pato, y otros dinosaurios; señala el final del crecimiento activo, el punto en que el animal alcanzó el tamaño adulto.

Según los retrocálculos, *T. rex* tardaba entre 15 y 18 años en alcanzar el tamaño adulto: tres metros de altura de cadera, 11 metros de longitud y de 5000 a 8000 kilogramos de peso. (Nuestras estimaciones coincidían con las del grupo de Gregory M. Erickson, de la Universidad estatal de Florida, realizadas por la misma época.) Sin duda un crecimiento rápido, al menos para un reptil. Resultó, pues, que la tasa de crecimiento de los dinosaurios era muy superior a la de otros reptiles, vivos o extinguidos.

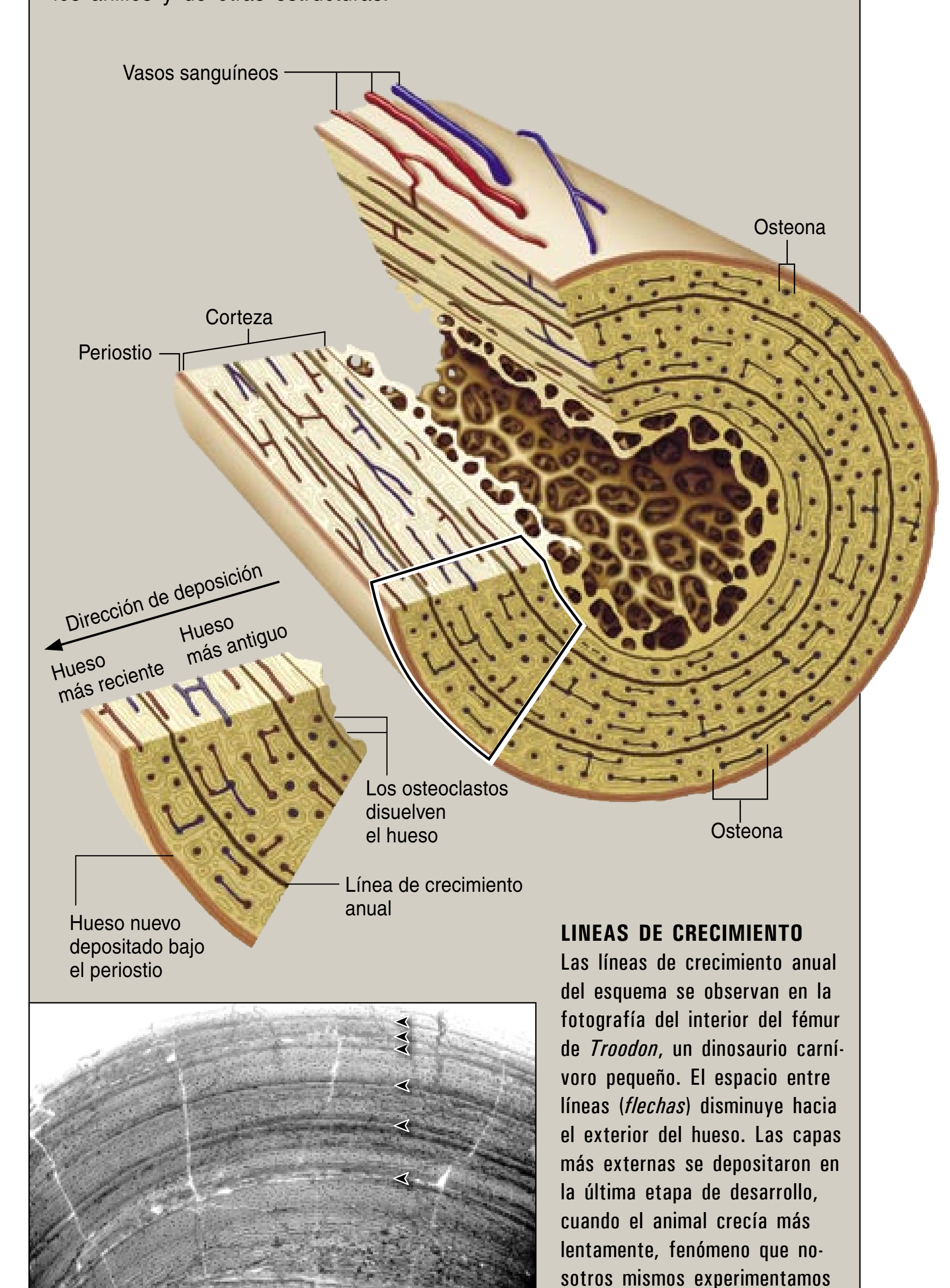
Erickson y Christopher A. Brochu, de la Universidad de Iowa, estudiaron el desarrollo de *Deinosuchus*, el cocodrilo gigante que vivió durante el Cretácico, hace entre 75 y 80 millones de años. Según sus estimaciones, esos reptiles imponentes medían de 10 a 11 metros de longitud. A partir de las líneas de crecimiento en la armadura cutánea del cuello, determinaron que el animal necesitaba casi 50 años para alcanzar dicha longitud, el triple de lo que tardaba *T. rex* en lograr esa extensión. Una comparación más acorde con *T. rex* se halla en el elefante africano: alcanza casi la misma masa (entre 5000 y 6500 kilogramos) en un período de entre 25 y 35 años. Así pues, *T. rex* llegaba al tamaño adulto con mayor prontitud que un elefante.

Investigaciones posteriores demostraron que *T. rex* no constituía ninguna rareza entre los dinosaurios; aunque sí es cierto que crecía con mayor parsimonia, para su tamaño, que otros dinosaurios gigantes. Anusuya Chinsamy-Turan, hoy en la Universidad de Ciudad del Cabo, encontró que *Massospondylus*, un herbívoro, tardaba unos 15 años en alcanzar de dos a tres metros de longitud. Erick-

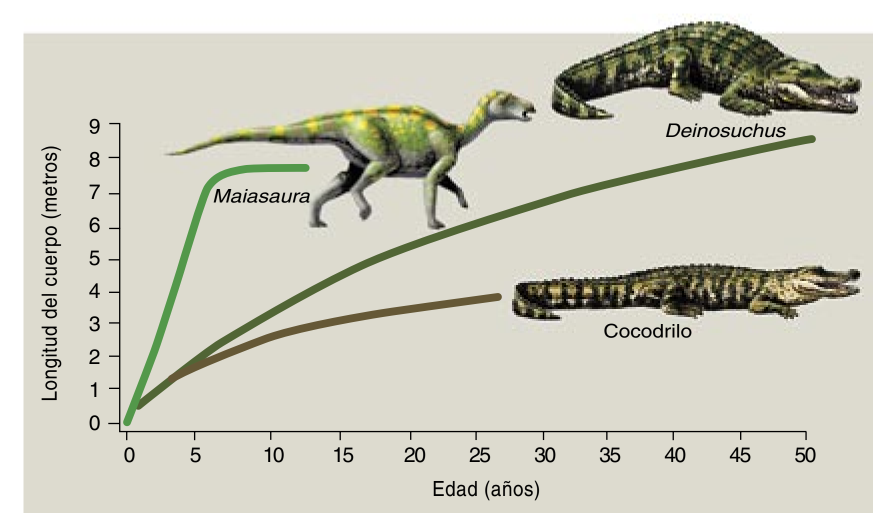
SHAWN GOULD (*ilustraciones*); JOHN R. HORNER, KEVIN PADIAN Y ARMAND DE RICQLES (*fotografía*)

HISTOLOGIA DE UN HUESO DE DINOSAURIO

En los huesos de dinosaurio se observan líneas de crecimiento; aunque similares a los anillos anuales de los árboles, su interpretación entraña mayor complejidad. Minerales (fosfato cálcico) y proteínas (colágeno) forman la corteza del hueso; ambos componentes son transportados por los vasos sanguíneos. La osteona constituye la unidad básica estructural del tejido óseo: consta de un canal vascular rodeado de lamelas concéntricas. En el fémur y otros huesos largos, el crecimiento se concentra debajo del periostio, la membrana externa. Al propio tiempo, los osteoclastos disuelven el margen interno del hueso. Una serie secundaria de osteonas puede invadir el hueso preexistente, erosionándolo y depositando tejido óseo nuevo. Debido a esta actividad permanente, la edad del animal no puede deducirse del mero recuento de líneas de crecimiento, sino que exige diversos análisis de los anillos y de otras estructuras.



LINEAS DE CRECIMIENTO
Las líneas de crecimiento anual del esquema se observan en la fotografía del interior del fémur de *Troodon*, un dinosaurio carnívoro pequeño. El espacio entre líneas (*flechas*) disminuye hacia el exterior del hueso. Las capas más externas se depositaron en la última etapa de desarrollo, cuando el animal crecía más lentamente, fenómeno que nosotros mismos experimentamos con la edad.



2. LAS CURVAS DE CRECIMIENTO muestran que incluso los dinosaurios gigantes llegaban al tamaño adulto en su adolescencia. Crecían y llegaban al tamaño adulto con mayor celeridad que los reptiles comunes.

son y Tatanya A. Tumanova, del Instituto Paleontológico de Moscú, estimaron que el pequeño ceratópsido cornudo *Psittacosaurus* alcanzaba el tamaño adulto entre los 13 y los 15 años. Nosotros calculamos que el dinosaurio de pico de pato *Maiasaura* lo lograba hacia los siete u ocho años, momento en que ya medía siete metros de largo.

Pero los saurópodos gigantes (del tipo de los "brontosaurios") superan a todos los demás. Martin Sander, de la Universidad de Bonn, descubrió que *Janenschia* ya era adulto hacia los 11 años de edad, aunque después continuaba creciendo de forma notable. Frédérique Rimblot-Baly y su equipo, de la Universidad París VII, determinaron que *Lapparentosaurus* llegaba a su tamaño adulto antes de los 20 años. Kristina Curry Rogers, del Museo de Ciencia de Minnesota, encontró que *Apatosaurus* (más conocido como *Brontosaurus*), maduraba a los 8 o 10 años, lo que supone un aumento de peso anual máximo de casi 5500 kilogramos.

El interior de un hueso de dinosaurio

¿Por qué el desarrollo de los dinosaurios guardaba mayor semejanza con el de los elefantes que con el de los cocodrilos gigantes? ¿Qué relación tiene tan elevada tasa de crecimiento con otros aspectos de su biología? Para responder a estas cuestiones, hemos de ahondar antes en la histología del hueso de dinosaurio.

El tejido de un hueso largo de dinosaurio es esencialmente fibrolamelar: presenta una textura fibrosa, o "entretejida", y se forma alrededor de una matriz vascularizada de fibras de colágeno poco organizadas. Este tipo de hueso no predomina en los reptiles, sino en aves y mamíferos de gran tamaño, cuyo crecimiento procede con mayor celeridad que

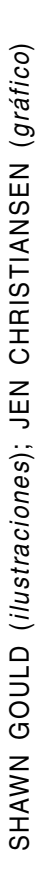
AVES PRIMITIVAS

¿Arrojan los nuevos descubrimientos en torno al elevado ritmo de crecimiento de los dinosaurios extintos alguna luz sobre la evolución de las aves, dinosaurios vivientes? ¿Por qué las aves presentan un tamaño corporal harto menor que el de los dinosaurios? ¿Alteraron su tasa de crecimiento? Para resolver estas cuestiones, examinamos el tejido óseo de *Confuciusornis*, un ave primitiva del Cretácico Temprano (hace 125 millones de años) de China; aparece en el árbol familiar aviar poco después de *Archaeopteryx*, la primera ave conocida. El tejido del interior de los huesos de *Confuciusornis*, del tamaño de un cuervo, es fibrolamelar de crecimiento rápido (como el de otros dinosaurios); hacia el exterior, en cambio, se transforma en tejido de crecimiento más lento. Se nos indica con ello que la tasa de crecimiento se redujo tras un corto esfuerzo juvenil. Comparamos estos huesos con los de *Troodon*, un pequeño dinosaurio raptor de aproximadamente 1,5 metros de longitud, analizados por David J. Varricchio, de la Universidad estatal de Montana. El tejido óseo de *Troodon* reveló un desarrollo general más rápido.

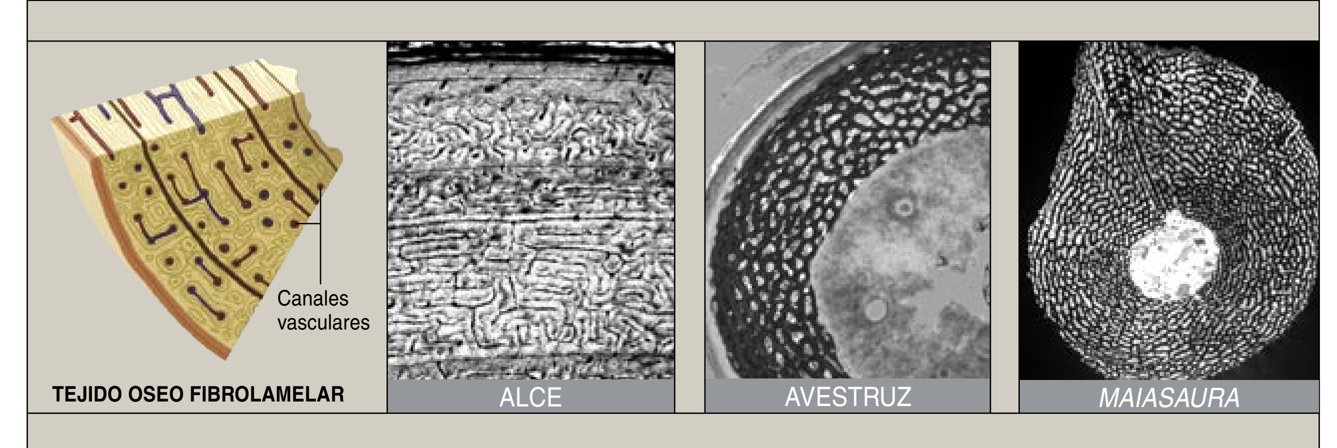
Parece, pues, que las primeras aves redujeron el tamaño corporal acortando la fase de crecimiento rápido de sus antecesores. Esta miniaturización tuvo una consecuencia determinante para la locomoción: las plumas de las extremidades anteriores de los dinosaurios que eran los parientes más próximos de las aves contribuirían a que éstas pudieran volar. Los animales de tamaño reducido pueden batir las alas a mayor velocidad que los grandes; la miniaturización reduce también la carga del ala (la relación entre el peso y la superficie alar, o cuánto peso ha de soportar una unidad de superficie) y, por tanto, resulta aerodinámicamente ventajosa.

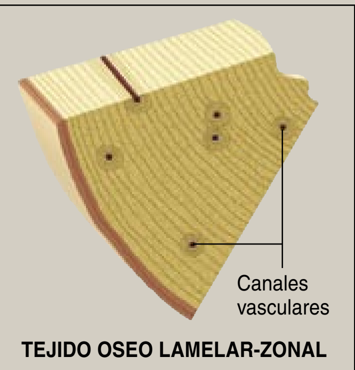
Pero las aves modernas alcanzan presto su tamaño adulto, por lo general en semanas o meses. ¿Qué cambió? Parece que después de lentificarse la tasa de crecimiento en las primeras etapas de su evolución, con el tiempo se aceleró de nuevo; en algunos casos supera incluso las de los extintos dinosaurios. Hace unos años, Anusuya Chinsamy-Turan, hoy en la Universidad de Ciudad del Cabo, y su equipo estudiaron el tejido óseo de aves del Cretácico Tardío, situadas un poco más adelante que *Archaeopteryx* y *Confuciusornis* en el árbol evolutivo: el áptero *Patagopteryx* (enantiornitino primitivo), el buceador *Hesperornis* e *Ichthyornis* (parecido a un charrán). También estas aves se desarrollaban con mayor parsimonia que los dinosaurios; sin embargo, las formas más cercanas a las aves modernas presentaban, según el análisis de sus tejidos, una tasa de crecimiento superior a la de las primeras aves.

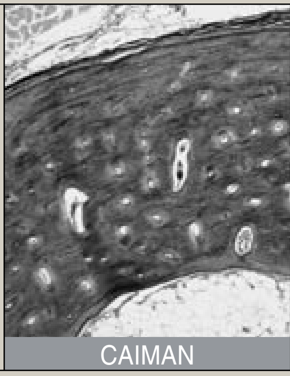
Cerca del límite entre el Cretácico y el Terciario, hace unos 65 millones de años, las tasas de crecimiento aumentaron de manera sustancial en las aves, hasta el punto de que todas las aves actuales, incluido el avestruz, alcanzan su tamaño adulto en menos de un año (siete días en el caso del gorrión). Sólo el estudio de aves del Terciario Temprano revelará si este patrón de crecimiento rápido se adquirió de forma súbita o gradual.



DINOSAURIOS Y REPTILES: DOS CRECIMIENTOS DISTINTOS







La parte interna de los huesos de dinosaurio guarda un estrecho parecido con la de los huesos de aves y mamíferos de porte notable (*arriba*). A diferencia de los reptiles (*izquierda*) constan de tejido óseo fibrolamelar: capas entramadas de minerales y fibras de colágeno vascularizadas.
La abundancia de vasos sanguíneos favorece la histogénesis y, por tanto, un desarrollo rápido. Los huesos de alce y de caimán que aquí se muestran pertenecen a individuos casi adultos. Hacia la parte externa del hueso se observa menor cantidad de canales vasculares, lo que comporta un crecimiento lento. Los huesos de avestruz y de *Maiasaura* provienen de individuos a punto de salir del cascarón. La copiosa vascularización indica un crecimiento rápido, que todavía no ha dado lugar al patrón fibrolamelar.

el de los reptiles. Un hueso de cocodrilo, en cambio, está formado principalmente por tejido lamelar-zonal: una estructura compacta, muy mineralizada, que contiene fibras con una organización más regular y una vascularización más pobre y dispersa. Además, el espacio entre líneas de crecimiento es menor en los huesos de cocodrilo que en los de dinosaurio, otro indicio de una menor tasa de crecimiento en los cocodrilos.

Rodolfo Amprino, de la Universidad de Turín, reconoció en los años cuarenta del siglo pasado que el tipo de tejido óseo depositado en un lugar o momento determinados del desarrollo dependía, sobre todo, de la velocidad de crecimiento del hueso en dicho punto. El tejido fibrolamelar refleja, con independencia de dónde y cuándo se deposite, un crecimiento localmente rápido. El tejido lamelar-zonal señala un crecimiento más lento.

Un animal puede depositar uno u otro de estos tejidos óseos en momentos distintos, de acuerdo con la estrategia de crecimiento seguida. Así, para estimar la tasa de crecimiento de un individuo, bastará con determinar qué tipo de tejido predomina en sus huesos.

Entre los dinosaurios, por un lado, y los cocodrilos y los demás reptiles, por otro, media una diferencia importante: los primeros depositan tejido óseo fibrolamelar en el transcurso de todo el crecimiento hasta el tamaño adulto, mientras que los segundos pasan muy pronto al lamelar-zonal. De ello se infiere que los dinosaurios crecían con mayor celeridad.

También Erickson, Rogers y Scott A. Yerby, de la Universidad de Stanford, calcularon la tasa de crecimiento de los dinosaurios, aunque de una manera distinta: diagramaron la masa corporal (estimada) de los animales en función del tiempo. Obtuvieron así curvas de crecimiento para diversas especies. Compararon las curvas resultantes con las correspondientes a otros grupos de vertebrados. Encontraron que los dinosaurios mostraban un desarrollo más célere que el de los reptiles modernos, que muchos dinosaurios crecían a tasas equiparables a las de los marsupiales actuales y que los dinosaurios de mayor tamaño crecían a un ritmo comparable con el de las aves de crecimiento rápido y con el de los mamíferos grandes. (Nuestros estudios basados en la longitud confirmaron dichos resultados.)

En cierto sentido, estos descubrimientos no fueron del todo inesperados. Hace muchos años, Ted J. Case, de la Universidad de California en Los Angeles, demostró que en el seno de cualquier grupo de vertebrados (peces, anfibios, etcétera), la tasa de crecimiento de las especies de mayor tamaño supera con creces la de las especies menores. Así, aunque las especies mayores tardan más tiempo en alcanzar la talla adulta, se dan más presteza en ello. Lo sorprendente no era, pues, que la tasa de crecimiento de los dinosaurios fuera *más* elevada que la de otros organismos, sino que fuera *tan* elevada.

¿En qué momento de su evolución los dinosaurios adquirieron esta pauta de crecimiento rápido? Relacionamos

SHAWN GOULD (*ilustraciones*); JOHN R. HORNER, KEVIN PADIAN Y ARMAND DE RICQLES (*fotografía*)

CRECIMIENTO OSEO Y EVOLUCION EN LAS AVES

ARCOSAURIOS
DINOSAURIOS
TEROPODOS
AVIALES

Cocodrilos
3-5 metros

Brachiosaurus
25 m

Coelophysis
3 m

Troodon
2 m

Archaeopteryx
60 centímetros

Confuciusornis
60 cm

Tejido óseo lamelar-zonal; baja vascularización; crecimiento lento; tasas metabólicas basales bajas

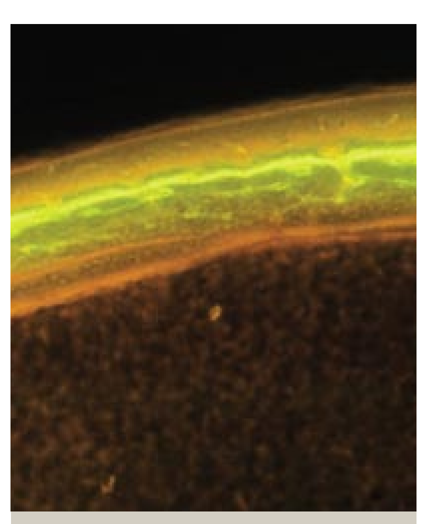
Tejido óseo fibrolamelar; alta vascularización; crecimiento rápido; tasas metabólicas basales mayores

Reducción del tamaño corporal mediante el truncamiento de la fase de crecimiento rápido

Reducción del número de canales vasculares, típico de animales de menor tamaño

las tasas de crecimiento estimadas en un cladograma —diagrama de parentesco—, construido sobre la base de cientos de caracteres diferentes, procedentes de todas las partes del esqueleto. Añadimos las tasas de crecimiento estimadas para los pterosaurios (reptiles voladores estrechamente emparentados con los dinosaurios, que crecían de forma muy parecida a ellos), cocodrilos y sus parientes extinguidos, y lagartos. Pusimos las aves entre los dinosaurios, dado que aquéllas evolucionaron a partir de éstos [*véase* "El origen de las aves y su vuelo", de Kevin Padian y Luis M. Chiappe; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, abril 1998].

Para afinar la estimación de las tasas de crecimiento de los dinosaurios, nos fijamos también en las aves modernas, que muestran la misma gama de tejidos óseos que los dinosaurios. Jacques Castanet y su grupo, de la Universidad París VII, inyectaron a ánades reales soluciones que tiñen los huesos en desarrollo. Utilizando colores distintos en diferentes momentos, midieron la tasa de crecimiento semanal en las aves sacrificadas. Basados en tales calibraciones, determinamos nosotros que la tasa de crecimiento de dinosaurios y pterosaurios era, sin excepción, mucho mayor que la de los demás reptiles. Entre dinosaurios y pterosaurios encontramos también una notable variación, análoga a los descubrimientos de Castanet en aves: los animales que se desarrollaban con mayor parsimonia eran los de menor tamaño; exactamente eso predecían los patrones de Ted Case.

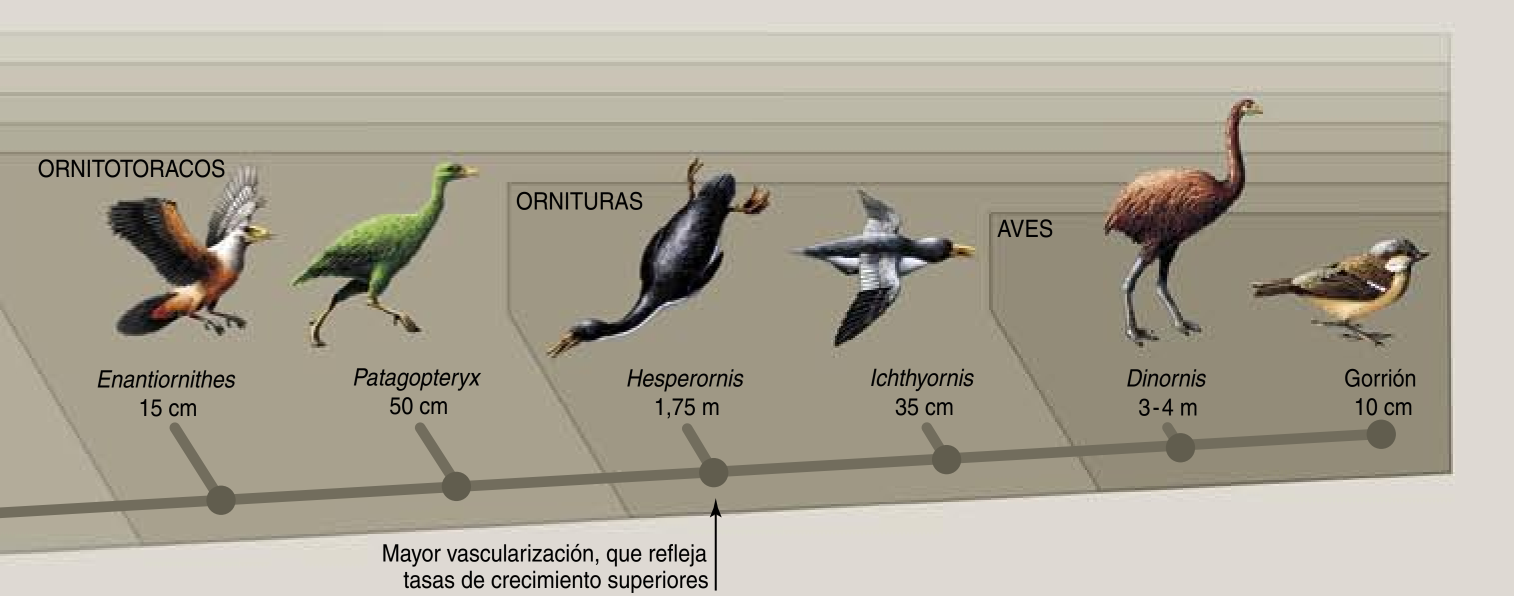


3. TEJIDO OSEO de un ánade real. Cada color corresponde a una capa de tejido depositada durante una semana. La estructura se revela mediante la inyección semanal de un colorante fluorescente verde, amarillo o naranja.

Reptiles atípicos

El estudio de los huesos de dinosaurios ha arrojado luz sobre la evolución de algunas de las principales características de estos animales. Hace unos 230 millones de años, en pleno Triásico, el linaje que iba a producir los dinosaurios, los pterosaurios y sus parientes se escindió del que iba a producir los cocodrilos y sus semejantes. Los dinosaurios pronto adquirieron elevadas tasas de crecimiento continuado, que los diferenció de otros reptiles. Este crecimiento célere quizá propició el éxito del que disfrutaron dinosaurios y pterosaurios hacia el final de ese período geológico, cuando se extinguieron muchos parientes de los cocodrilos y

SHAWN GOULD (*ilustraciones*); JEN CHRISTIANSEN (*cladograma*); JACQUES CASTANET (*fotografía*)



Desde su aparición, los dinosaurios se caracterizan por un tejido óseo que difiere del que presentan otros reptiles: se desarrollaba más rápidamente, como el de las aves y mamíferos actuales. Cuando las primeras aves (Aviales) evolucionaron, el paso parsimonioso del crecimiento de sus huesos dio lugar a una reducción sustancial del tamaño corporal. Aun así, su tasa de crecimiento seguía siendo mayor que la de otros reptiles. Después, conforme fueron apareciendo los grupos de aves actuales (Aves), el desarrollo óseo se aceleró de nuevo; las aves del tamaño de una paloma maduraban en semanas, no en meses. Todas las aves modernas, avestruz incluido, alcanzan el tamaño adulto en un año; muchas, antes (el gorrión en siete días). La miniaturización que experimentaron las aves en el curso de su evolución derivó de la reducción de la tasa de crecimiento en el período juvenil: etapa de crecimiento máximo en los antepasados dinosaurios.

otros grupos arcaicos con estructura ósea reptiliana.

La elevada tasa de crecimiento de los dinosaurios proporciona asimismo una idea más firme acerca de su metabolismo. Cuanto mayor es la tasa metabólica (es decir, cuanto mayor es la energía dedicada a producir y descomponer hueso y otros tejidos), mayor es la tasa de crecimiento de los tejidos. De modo que el desarrollo rápido continuado, incluso en los estadios juvenil tardío y subadulto, demuestra que los animales en cuestión tenían una tasa metabólica basal elevada. Dado que el crecimiento de los dinosaurios no guardaba semejanza con los reptiles actuales, sino con las aves y los mamíferos, su tasa metabólica debía acercarse más a la de aves y mamíferos que a la de los reptiles actuales. De ello se infiere que fueron, en un sentido general, animales de sangre caliente.

Pero, ¿cuál era entonces su temperatura corporal? ¿Cuál su gama de variación? ¿Cuánto calor absorbían del entorno? ¿Cuánto necesitaban disipar en el medio? Sobre la biología de tan insólitos seres —distintos de los animales modernos y también de los reptiles típicos— quedan todavía muchas cuestiones pendientes. Si se descubriera algún ave viva de cinco toneladas, la mayoría quedarían resueltas.

Los autores

John R. Horner, Kevin Padian y Armand de Ricqlès colaboran en el estudio de los huesos de dinosaurios desde hace más de 12 años. Horner es conservador en el Museo de las Rocosas de la Universidad estatal de Montana, tarea que comparte con la docencia de paleontología. Padian enseña biología de sistemas y es conservador del Museo de Paleontología de la Universidad de California en Berkeley. De Ricqlès, profesor en el Colegio de Francia en París, ocupa la cátedra de biología evolutiva; su equipo del CNRS de la Universidad París VII investiga la histogénesis del hueso y de otros tejidos esqueléticos.

Bibliografía complementaria

DINOSAURIAN GROWTH RATES AND BIRD ORIGINS. K. Padian, A. J. de Ricqlès y J. R. Horner en *Nature*, vol. 412, págs. 405-408; 26 julio 2001.

DINOSAURIAN GROWTH PATTERNS AND RAPID AVIAN GROWTH RATES. G. M. Erickson, K. Curry Rogers y S. A. Yerby en *Nature*, vol. 412, págs. 429-433; 26 julio 2001.

AGE AND GROWTH DYNAMICS OF *TYRANNOSAURUS REX*. J. R. Horner y K. Padian en *Proceedings of the Royal Society of London, Biological Sciences*, vol. 271, n.º 1551, págs. 1875-1880; 22 septiembre 2004.

GROWTH IN SMALL DINOSAURS AND PTEROSAURS: THE EVOLUTION OF ARCHOSAURIAN GROWTH STRATEGIES. K. Padian, J. R. Horner y A. J. de Ricqlès en *Journal of Vertebrate Paleontology*, vol. 24, n.º 3, págs. 555-571; septiembre 2004.

PHYSIOLOGY. K. Padian y J. R. Horner en *The Dinosauria*, segunda edición. D. Weishampel, P. Dodson y H. Osmólska (coordinadores). University of California Press, 2004.

Supervientos galácticos

La energía originada por múltiples e intensos brotes de formación estelar se autocolima y desencadena vientos galácticos, que fluyen hasta el medio intergaláctico

Guillermo Tenorio Tagle, Casiana Muñoz Tuñón, Verónica Melo y Sergiy Silich

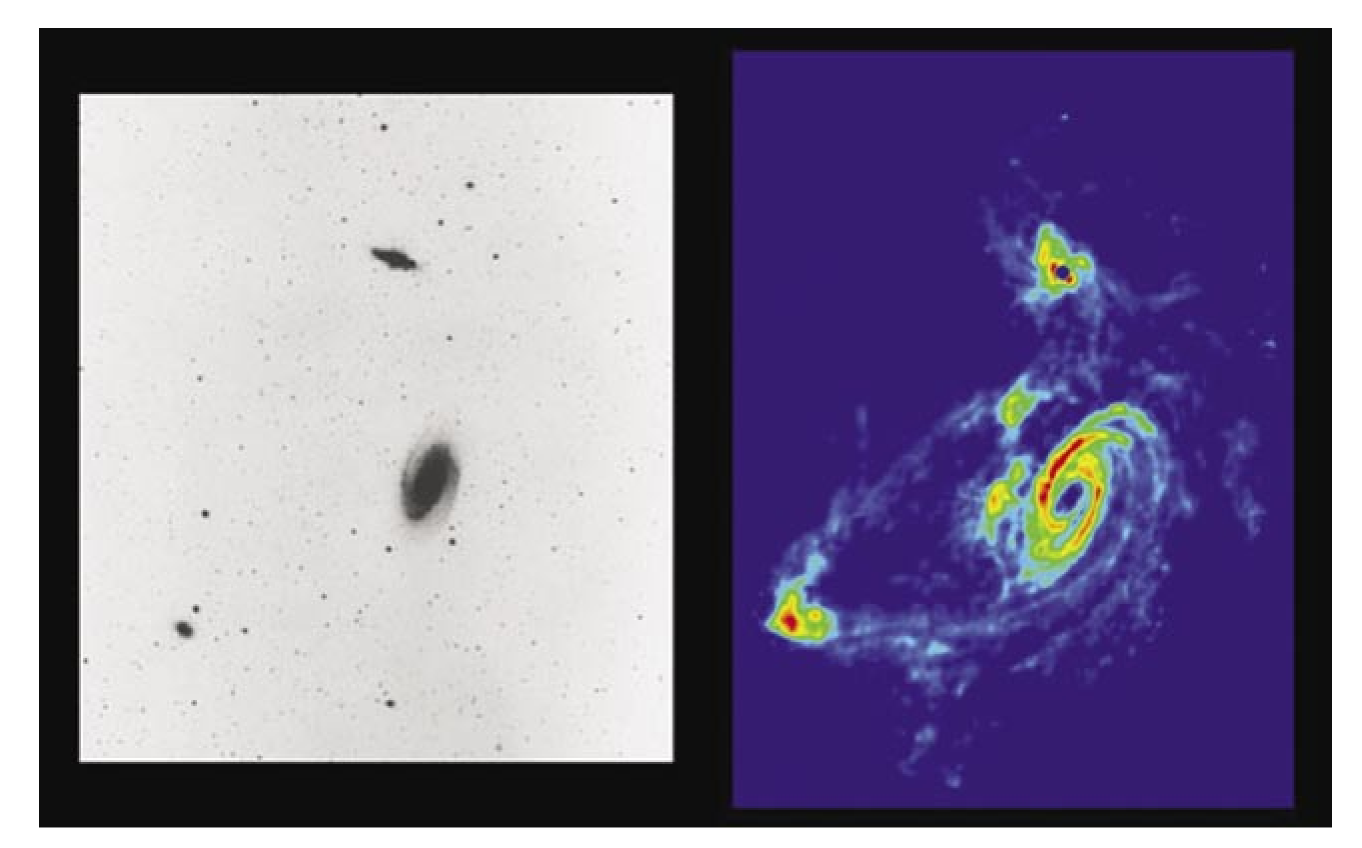
Los brotes de formación estelar, episodios intensos de formación de nuevas estrellas en las galaxias, desempeñan un papel central en la evolución galáctica tanto en la parte de universo próxima a nosotros como en el universo más joven.

Alrededor de un 10 % de las galaxias cercanas albergan intensos brotes de formación estelar. Entre ellas, la galaxia M82 posee el más luminoso. Esta galaxia pertenece al Grupo de M81, que contemplamos cerca de la constelación de la Osa Mayor. El Grupo de M81, uno de los más próximos al Grupo Local de galaxias (del que forma parte la nuestra), se encuentra a una distancia de 12 millones de años luz. Contiene, entre otros objetos, M81 y M82, par de galaxias ya incluidas en el catálogo de Messier, compilado en el siglo XVIII, y otras dos galaxias muy próximas, NGC3077 y NGC2976. Cuando se observa el Grupo de M81 en la longitud de onda del hidrógeno neutro (la emisión en 21 cm que se produce cuando los espines del protón y el electrón de un átomo de hidrógeno pasan de paralelos a antiparalelos), resulta muy diferente de la imagen que recibimos con longitudes de onda visibles. El hidrógeno neutro presenta una estructura muy rica que conecta las galaxias del grupo; sin embargo, en el rango visible, las galaxias, parecen completamente aisladas unas de otras. De la imagen en 21 cm resulta interesante que el flujo de hidrógeno neutro confluya en la galaxia M82; podría explicar la elevada cantidad de gas que contiene, condición además indispensable para mantener el ritmo frenético de formación de estrellas en su núcleo.

M82 es una de las galaxias que ofrece mayor interés del universo cercano. Se trata de una galaxia enana con una masa total cien veces menor que la de la Vía Láctea; ninguna otra, sin embargo, brilla más en la zona infrarroja del espectro electromagnético. Su luminosidad es 3×10^{10} veces la del Sol. Contiene más de mil millones de masas solares en estrellas y gas. La fracción de gas, entre el 30 y el 40 %, resulta inusualmente elevada; el valor típico en otras galaxias cae entre el 5 y el 15 %. La gran masa de gas que oculta la mayoría de sus estrellas la convierte en un enigma. La elevada densidad del material interestelar fuerza allí la física galáctica y desencadena el proceso de los supervientos galácticos. Se creía que éste sucedía en las galaxias primigenias sólo en la época de su gestación.

El telescopio japonés Subaru, con su espejo primario de 8,2 m de diámetro, nos presentó una faceta nueva de la galaxia M82 al obtener su imagen en el rango óptico del espectro con un filtro que detecta la emisión del gas a 10^4 K, temperatura a la que el hidrógeno se halla ionizado (emisión H_α). Según la imagen de la misma, obtenida en el primer Estudio de los Cielos del Observatorio de Palomar —colección sistemática de imágenes de los cielos confeccionada en los años cincuenta con el telescopio Schmidt de Monte Palomar—, M82 era una estructura elipsoidal muy alargada. En la nueva imagen se nos descubrían otros rasgos suyos: unas estructuras casi cónicas que, de forma muy simétrica, se extienden desde el núcleo hacia los polos de la galaxia, para alcanzar distancias de varios miles de años luz (2 o 3 veces el tamaño de la galaxia). Las estructuras se componen de un sinnúmero de filamentos densos entretejidos, inmersos en un gas más tenue con una emisión difusa que también se capta en H_α.

La imagen de M82 tomada por el telescopio Subaru la ha convertido en la galaxia prototipo de las que tienen un superviento galáctico bien desarrollado. El concepto de superviento galáctico se originó cuando se buscaba una explicación del elevado contenido metálico del gas intergaláctico. Sólo las estrellas transforman el hidrógeno, del que inicialmente se formaron, en elementos más pesados: helio, oxígeno, hierro, etc. que en astrofísica se llaman metales. De tales estrellas, las de mayor masa, en concreto las que tienen más de 8 masas solares, acaban su vida explotando como supernovas y reintegrando al medio en que se formaron el material procesado a lo largo de toda su existencia. Así, en galaxias con un ritmo de formación estelar muy alto, la energía cinética proporcionada por sus vientos estelares y las explosiones múltiples de supernova podría vencer el potencial gravitatorio galáctico y lanzar todo el material enriquecido fuera de la galaxia. El concepto de superviento galáctico, por intuitivo, cuenta con mucha aceptación desde los años noventa del siglo pasado. De momento sólo en M82 se



1. EL GRUPO DE M81 VISTO EN HI (*derecha*) y en longitudes de onda visibles (*izquierda*). Se halla a una distancia de 12 millones de años luz. Es uno de los grupos de galaxias más próximos al Grupo Local, en el que se integra la Vía Láctea. La imagen es una composición de la imagen en frecuencias de radio del Radioobservatorio Astronómico Nacional estadounidense y la tomada con luz visible del Estudio de los Cielos del Observatorio de Palomar. M81 es la galaxia espiral que se ve justo en el centro de las imágenes; la galaxia M82, la condensación que apreciamos por encima en la parte central; y la galaxia NGC3077, la que está abajo y a la izquierda. Vemos al menos dos galaxias enanas justo a la izquierda de M81 en la estela que va hacia M82. En la imagen en radio que se muestra (*a la derecha*) se aprecia que NGC3077 está interaccionando con M81 y M82 y quizá también con otras pequeñas galaxias, todas ellas empaquetadas en un envoltorio de gas común. Además de las que aparecen en el campo de la imagen que mostramos, el grupo de M81 aloja otras galaxias importantes por su tamaño y brillo: la galaxia irregular NGC2366 y la espiral Sc, NGC2403, ambas en la constelación de Camelopardalis, IC 2574, irregular pero con indicios de incipientes brazos espirales, y las dos grandes irregulares Holmberg I y Holmberg II.

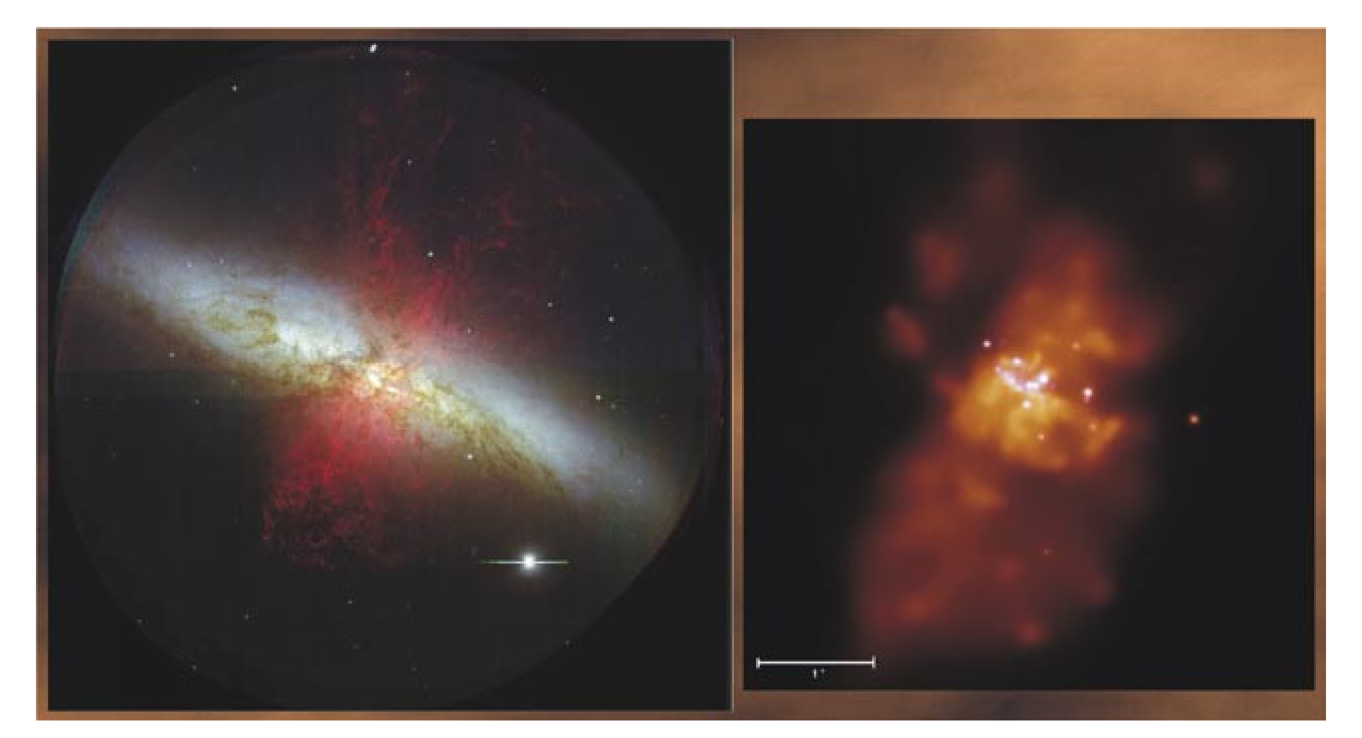
GUILLERMO TENORIO TAGLE. CASIANA MUÑOZ TUÑON, VERONICA MELO Y SERGIY SILICH

han visto los canales por los que parece fluir el material hasta distancias equiparables al tamaño de la galaxia, y aún mayores.

La emisión del gas ionizado en el núcleo de M82 es muy considerable. Son más de 10^{42} los ergios por segundo (unos mil millones de veces la luminosidad solar) los producidos por los fotones ultravioleta (UV) que emanan de las estrellas calientes creadas en el brote de formación de estrellas de M82. La imagen del gas ionizado, que parece fluir en la dirección de los polos de la galaxia, nos lleva a pensar en un material generado en el corazón del brote estelar, en el núcleo de la galaxia, que escapa hacia el halo galáctico —la difusa esfera de estrellas que rodea el disco—, para abandonarla de manera definitiva. En el centro de la galaxia, sobre el disco, hay un área de unos 30” (unos 1500 años luz) de diámetro donde se alojan millones de estrellas recién formadas que, con edades de menos de 10 millones de años, ionizan su entorno con un flujo ultravioleta de más de 10^{53} fotones por segundo. La zona nuclear de M82 está manchada con numerosas bandas oscuras, polvo interestelar que, generado también en las estrellas, extingue la radiación del rango visible y absorbe los fotones UV estelares.

El Telescopio Hubble ha revelado un nuevo elemento en las galaxias con violentos brotes de formación estelar: los supercúmulos estelares (SCE), grupos de estrellas, con una masa total de entre 10^3 y 10^7 masas solares, concentrados en áreas pequeñísimas, de entre 9 y 18 años luz de radio. Este descubrimiento tan importante parece mostrar además que los brotes masivos de estrellas, como el de M82, son en realidad una plétora de SCE. Cada brote masivo puede comprender incluso varios millones de estrellas. La función inicial de masa (FIM) —la distribución estadística de las masas de las estrellas de una cierta población en el momento de su constitución— de los supercúmulos estelares podría ser universal. A partir del análisis de la imagen del gas ionizado (emisión de hidrógeno a 6563 angstrom) del archivo del Telescopio Espacial Hubble hemos catalogado 200 SCE en M82; juntos, definen la magnitud del brote estelar en el núcleo de la galaxia.

Si buscamos la emisión nebular menos intensa, encontraremos áreas



2. GALAXIA M82. La imagen tomada por el telescopio Subaru saca a la luz los violentos efectos del enorme brote de formación estelar; con su poderosa energía desgarra el núcleo de la galaxia y lo proyecta al medio intergaláctico. A la derecha, M82 según la observó la sonda espacial *Chandra* en rayos X. Los filamentos detectados en la parte óptica del espectro y el gas, a temperaturas de millones de grados, emisor de rayos X, coinciden espacialmente. Emanan del núcleo de la galaxia.

muy extensas que envuelven, como grandes abanicos, el cuerpo alargado de la galaxia. Más del 50 por ciento del material ionizado por los fotones de los SCE jóvenes se halla en filamentos densos que emergen de la zona nuclear del disco; llenan un volumen que, proyectado en el cielo, se ve como dos cilindros de una anchura comparable al del brote estelar central, unos 35”, equivalente a mil ochocientos años luz. Los filamentos que rellenan la estructura llegan hasta a distancias grandes del disco de la galaxia; los más lejanos se pueden seguir hasta unos nueve mil años luz, cinco veces la dimensión del brote central. Además, se observa superpuesta una emisión muy tenue, originada en un material a una temperatura similar, pero mucho menos denso. Esta emisión difusa se extiende aún más que los filamentos; engloba su estructura.

La emisión del gas más caliente, la que detectamos en el rango de los rayos X (formada por fotones de una energía del orden de los kiloelectronvolt, equivalente a una longitud de onda de decenas de angstroms) presenta también dos aspectos: una estructura conspicua, que a rasgos generales sigue la de la emisión de los filamentos en H_{α}, y otra más difusa y sin formas definidas, que se extiende hasta dieciocho mil años luz del disco, mucho más allá que la emisión del gas ionizado.

Son muchas las incógnitas que encuentra el análisis de la apariencia de M82. También hay que revisar y establecer el paradigma de los supervientos galácticos para entender las medidas que proporcionan las observaciones, cada vez más prolijas, de la galaxia. Poco a poco se va desentrañando la complejidad de la estructura de los filamentos. Necesita explicación, a su vez, la emisión extendida de gas caliente en rayos X, de más de 10^{41} ergs/s, que llega hasta los dieciocho mil años luz. Otro problema más es el confinamiento circunscrito a una zona muy pequeña en el núcleo de la galaxia, donde se deposita tanta energía como para lanzar el material fuera de la galaxia. El alto grado de colimación que alcanzan los supervientos es otra incógnita a resolver. Tras abordar los problemas que acabamos de mencionar, revisaremos los modelos más recientes que han permitido resolverlos.

Cúmulos y supercúmulos de estrellas

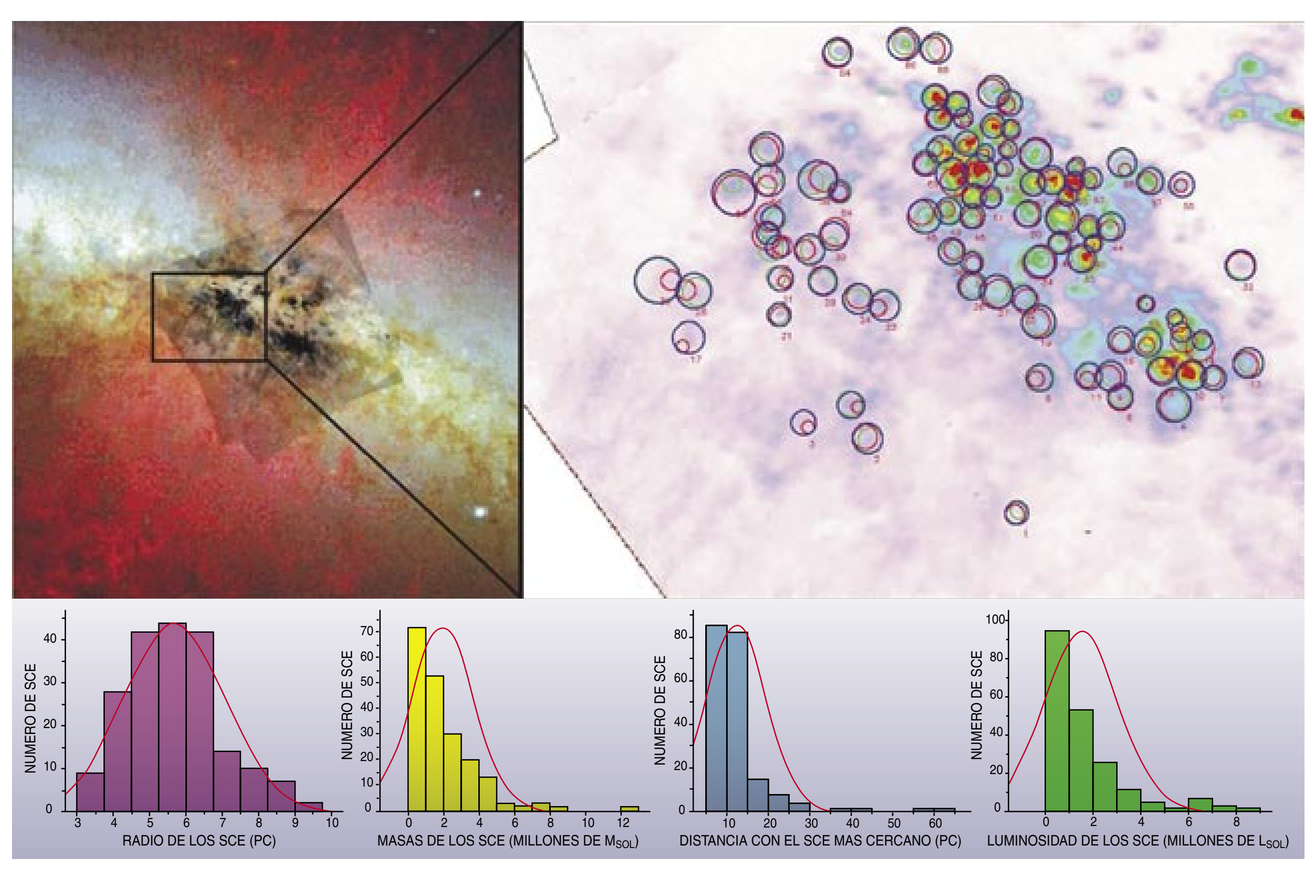
Hasta la fecha, y con la excepción de nuestro articulo en el *Astrophysical Journal* de diciembre de 2003, todos los cálculos publicados han supuesto que la inyección de energía mecánica que genera un superviento galáctico emana de un cúmulo de estrellas central cuyo diámetro mide de unas decenas a unas centenas de años luz, tamaño asociado al brote estelar. Sin embargo, observaciones recientes en frecuencias ópticas, en el continuo de radio, infrarrojas y en el ultravioleta han revelado la existencia de un buen número de grupos de estrellas de gran masa y reducido tamaño (supercúmulos estelares), en los núcleos de galaxias con estallidos de formación estelar. Su tamaño típico, del orden de unos diez años luz de radio, es un indicador del alto grado de concentración de estrellas que se alcanza en estos sistemas. Ese parámetro se infiere de medir la distancia a la cual la luminosidad de estos grupos masivos de estrellas decae a la mitad de su valor máximo y central. Luis Ho, de la Institución Carnegie en Pasadena,

recopiló las propiedades, incluida la masa de estos espectaculares centros de formación estelar, que cubren un rango de masas que va de decenas de miles a millones de masas solares (una masa solar es igual a 2×10^{27} toneladas). Adviértese, pues, que esas unidades de formación estelar difieren de cuanto se consideró, tiempo atrás, un brote masivo de formación estelar. Se han encontrado más de 200 supercúmulos estelares en el núcleo de M82 y hay por lo menos una decena de ellos en el corazón de la galaxia NGC253; varios cientos están semiocultos y enredados en las masivas nubes de gas y de polvo que resultaron de la colisión de galaxias de la "Antena".

La existencia de estos grupos de formación estelar, masivos y compactos, tiene múltiples consecuencias; en particular, si presentan una función inicial de masa (FIM) parecida a la encontrada por Salpeter (1955) para los grupos de estrellas en la vecindad solar. La FIM define el número de estrellas de gran masa presente en todo brote de formación estelar y, por tanto, la cantidad de luz y de energía que ha de esperarse de éstos. Consecuentemente, define también la cantidad de materia que ha de reinsertarse, por medio de vientos estelares y explosiones de supernova, en el medio interestelar del que se formaron las estrellas; abarca, además, la fracción de esa materia que corresponde a los elementos pesados, recién procesados en los interiores estelares. Un millón de masas solares en estrellas y la función inicial de masa universal implican la coexistencia de varias decenas de miles de estrellas masivas (de masas superiores a ocho veces la solar); por tanto, supone un continuo depositar de energía, producto de sus explosiones como supernovas, durante más de cincuenta millones de años. El impacto de tan violento y continuo depósito de energía en el medio circundante es devastador. Ese proceso determina la reestructuración del medio interestelar y, como exponemos aquí, la expulsión del material supernova hacia el medio intergaláctico, arrastrado por los supervientos galácticos.

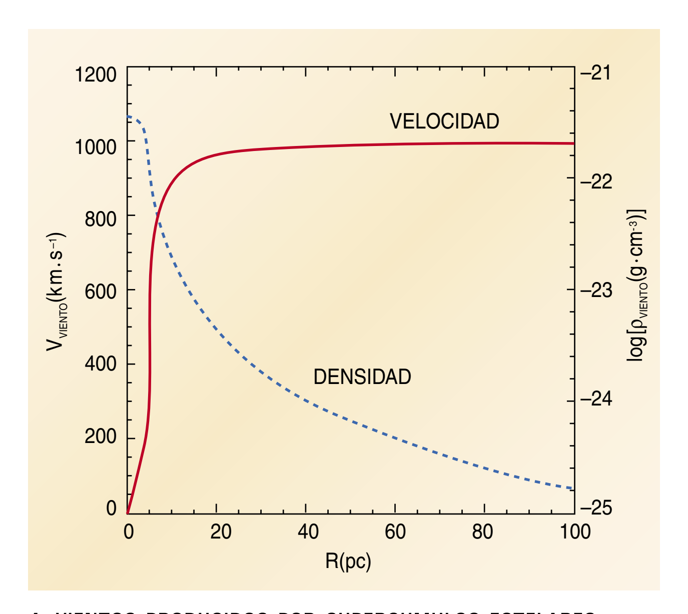
El origen de los vientos. Termalización de la energía mecánica estelar

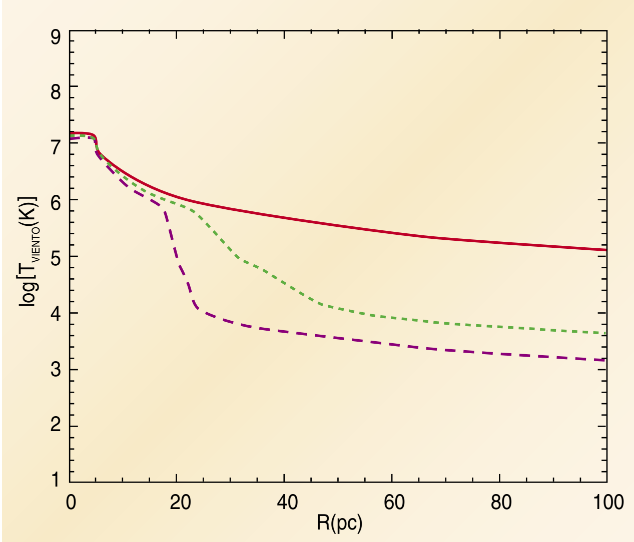
La enorme cantidad de energía mecánica depositada por violentos estallidos de formación estelar es la causa más obvia de la reestructuración del medio interestelar. Ese agente produce las superburbujas y supercascarones (*véase la figura 5*), así como la fase más caliente de la materia interestelar, el medio coronal. Ade-

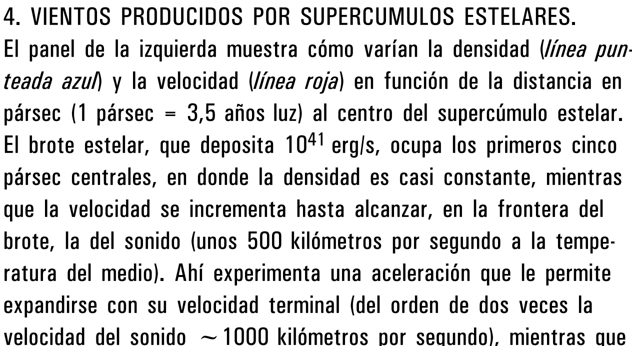


GUILLERMO TENORIO TAGLE. CASIANA MUÑOZ TUÑON, VERONICA MELO Y SERGIY SILICH

3. CATALOGO DE CUMULOS ESTELARES de M82. A la izquierda mostramos la galaxia M82 (estructura azulada con forma de puro) y, superpuestos en rojo, los filamentos (o superviento galáctico), según los ha observado el telescopio Subaru, cuyo espejo mide ocho metros de diámetro, con un filtro que mide el gas ionizado. El cuadrado superpuesto en la parte central es el campo observado con el Telescopio Espacial Hubble (HST). En la imagen de la derecha presentamos parte de ese campo del HST con los supercúmulos que hemos identificado y catalogado mediante el análisis de las imágenes disponibles en el archivo. En un área de 1840×1840 años luz identificamos 197 supercúmulos. Los histogramas dan una idea de la distribución de tamaños, masas, separación y luminosidad de los supercúmulos estelares (SCE) en el núcleo de M82.






4. VIENTOS PRODUCIDOS POR SUPERCUMULOS ESTELARES. El panel de la izquierda muestra cómo varían la densidad (*línea punteada azul*) y la velocidad (*línea roja*) en función de la distancia en pársec (1 pársec = 3,5 años luz) al centro del supercúmulo estelar. El brote estelar, que deposita 10^{41} erg/s, ocupa los primeros cinco pársec centrales, en donde la densidad es casi constante, mientras que la velocidad se incrementa hasta alcanzar, en la frontera del brote, la del sonido (unos 500 kilómetros por segundo a la temperatura del medio). Ahí experimenta una aceleración que le permite expandirse con su velocidad terminal (del orden de dos veces la velocidad del sonido ~1000 kilómetros por segundo), mientras que la densidad sigue cayendo con el inverso de la raíz cuadrada de la distancia. El panel de la derecha ilustra el comportamiento de la temperatura, también como función de la distancia al supercúmulo central. Se muestran tres casos: el caso adiabático o de energía constante (*línea roja*), en el que la temperatura disminuye como el inverso de la distancia elevado a la potencia 4/3, y dos casos más realistas, en los que el viento sufre enfriamiento radiativo: en uno se supone que su contenido en metales sea igual al solar (*línea verde*) o el doble del solar (*línea violeta*). Queda claro que el enfriamiento radiativo reduce drásticamente las dimensiones de la región de alta temperatura, emisora de rayos X; sólo en el académico caso adiabático se extiende sobre una región decenas de veces mayor que la ocupada por el cúmulo estelar.

más, dirige el desarrollo y estructuración de los supervientos galácticos en galaxias muy diversas.

¿De dónde surge toda esta energía? Es una pregunta que nos hemos planteado muchas veces. Emana de la energética estelar, de la evolución de las estrellas y en particular de las estrellas de alta masa que evolucionan rápidamente mientras que, por radiación, se desprenden de sus capas más externas y las inyectan continuamente, con velocidades elevadas, en el medio circundante. Al final de sus días las estrellas masivas terminan explotando como supernovas; depositan entonces más energía que la que hayan podido generar durante toda su vida. Toda esta energía proveniente de la evolución y muerte de las estrellas masivas, sumada para todas las estrellas de un brote estelar, en donde los vientos y las supernovas están correlacionados en el espacio y en el tiempo, representa la más poderosa e importante fuente de energía que mueve y mantiene el carácter dinámico del medio interestelar.

Todos los que estudian este fenómeno han supuesto que, en el corazón de los brotes masivos de formación estelar, el gas lanzado se halla termalizado, es decir, con las velocidades de sus partículas distribuidas conforme a las leyes de la termodinámica. La termalización resulta de la colisión continua de los múltiples flujos supersónicos (vientos y supernovas) dentro del volumen ocupado por el brote estelar; ese fenómeno causa la conversión de toda su energía cinética en energía térmica. Así se origina la intensa presión central que termina por expulsar al gas recién inyectado por las estrellas y responsable de la luminosidad mecánica que cada segundo emanará del brote. Dentro de esta región, las tasas medias de energía y de materia depositada, en confluencia con el tamaño de la región de formación estelar, definen la presión central. A su vez, la presión causa su expansión hacia el exterior. El flujo resultante experimenta una rápida evolución a medida que se aleja del cúmulo central; de hecho, al cruzar la frontera del brote, es inmediatamente acelerado por gradientes de presión y alcanza muy pronto su velocidad terminal.

Tal secuencia ocurre gracias a una rápida conversión de la energía térmica del viento resultante en energía cinética. Conforme el viento libre se aleje de la fuente central, su densidad, temperatura y presión decaerán como la distancia, r, elevada a las potencias −2, −4/3 y −10/3, respectivamente. Nótese que esos vientos libres están expuestos a la aparición repentina de ondas de choque de sentido inverso en caso de que una nube densa o una región de gran presión (térmica o magnética) obstaculice su camino.

Tal es el caso, por ejemplo, en el interior de las superburbujas. Ahí el viento libre empuja una onda de choque principal que barre, calienta, comprime y acelera al material circundante. La enorme presión adquirida por el material interestelar barrido excede enseguida la presión del viento libre; entonces, para restituir e igualar la presión, se lanza una

GUILLERMO TENORIO TAGLE. CASIANA MUÑOZ TUÑON, VERONICA MELO Y SERGIY SILICH

onda de choque de sentido inverso hacia el viento libre, lo termaliza y le restringe el volumen que ocupa. Por consiguiente, para que la zona de viento libre pueda extenderse a miles de años luz de distancia de su fuente central, la onda de choque principal tendrá que haber desplazado todo el material interestelar, dando lugar a un camino libre, a un túnel, por donde el viento pueda fluir sin impedimentos y llegar al medio intergaláctico, según propusieron Chevalier y Clegg en 1985.

En principio, el problema parecía resuelto. Sin embargo, al cotejar las observaciones con la teoría empezaron a surgir un sinnúmero de cuestiones inexplicables. Se encontró que la emisión de rayos X no sólo era más extensa y más intensa que lo predicho por la teoría, sino que además, como ya apuntábamos en la descripción de M82, emanaba de regiones también ocupadas por gas que emitía en las frecuencias ópticas. Los filamentos observados en frecuencias ópticas no forman parte de alguna estructura colimadora, sino que están inmersos en el gas emisor de rayos X.

Recientemente se encontró que uno de los supuestos centrales de la teoría de Chevalier y Clegg, —que el flujo sea adiabático (sin ganancia o perdida de energía)—, es inaplicable en condiciones realistas y en particular para brotes de formación estelar concentrados y energéticos. En estos casos quedan expuestos a un rápido enfriamiento por radiación, que modifica las características del viento resultante y, por tanto, sus propiedades observables. En pocas palabras, el caso adiabático, poco realista, lleva a conclusiones falsas.

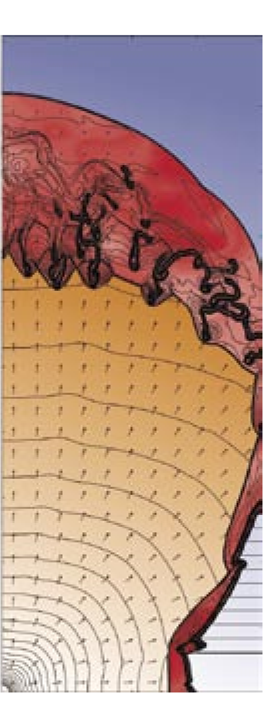
Al considerar el enfriamiento por radiación nos quedamos sin la región extendida de rayos X y con un flujo sin filamentos. Estos últimos se han querido explicar con inestabilidades en el cascarón de material interestelar barrido o con la inclusión de nubes densas preexistentes que se adentran en el remanente producido por la energética del brote. Sin embargo, en todos los casos anteriores, los filamentos aparecerían a grandes distancias (miles de años luz), fuera del plano de la galaxia, en vez de emanar del mismo brote estelar. También se ha querido explicar la estructura filamentosa con las paredes del remanente que, al romperse, al penetrar en el halo de la galaxia, se convertirían en un cono que al mismo tiempo confinaría el flujo central. Pero los filamentos más brillantes tendrían que aparecer entonces en los bordes y no como en M82, donde todos, centrales y laterales, brillan por igual.

Vientos de múltiples supercúmulos estelares

Basados en las pruebas observacionales que apuntan a la existencia de decenas de supercúmulos estelares en el núcleo de M82, hemos calculado la hidrodinámica que resulta de la interacción de los vientos producidos por una colección de supercúmulos estelares en un núcleo galáctico. Hemos considerado varios aspectos en esta primera aproximación, en dos dimensiones, a la interacción tridimensional de múltiples vientos. Uno de ellos es la metalicidad del material inyectado por los supercúmulos, que resulta de la evolución estelar y en particular de la evolución de las estrellas masivas y de su explosión final como supernovas. A lo largo de la evolución del supercúmulo alcanza, según hemos demostrado, valores de hasta más de diez veces la metalicidad solar. Estos valores exacerban el enfriamiento por radiación y causan un impacto enorme en las estructuras resultantes.

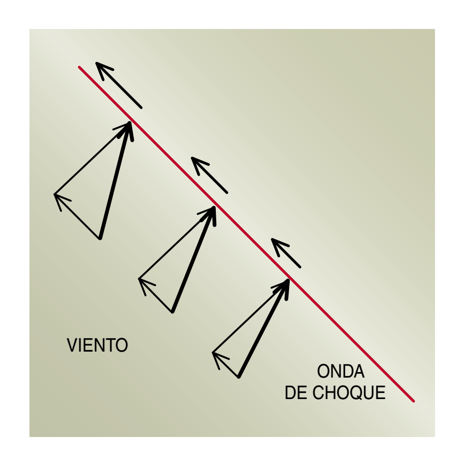
En nuestros cálculos hemos supuesto que tres poderosos supercúmulos estelares depositan 10^{41} erg/s cada uno en vientos isótropos con velocidades terminales de mil ki-





5. VIENTOS Y SUPERCASCARONES. La energía mecánica depositada por las estrellas masivas de un gran cúmulo de estrellas termina por producir un viento supersónico. Este origina la formación de una onda de choque principal, capaz de barrer y acelerar el material circundante. Se produce, en consecuencia, una reestructuración del medio interestelar. Al principio, el material barrido conforma un denso cascarón que se expande con velocidades muy similares en todas direcciones. La situación cambia radicalmente cuando el remanente excede las dimensiones del disco galáctico y se encuentra con la densidad menor característica de los halos de las galaxias. El cambio de densidad favorece la expansión hacia las regiones que presenten una menor resistencia, lo que deforma a gran escala el remanente. Más aún, si el gradiente de densidad es importante, el cascarón de material barrido se acelerará al penetrar en el halo, se volverá inestable y terminará fragmentándose y rompiéndose. Un segundo cascarón, empujado por el material del viento que se filtre entre los fragmentos, apilará el gas barrido del halo de la galaxia progenitora hasta que finalmente, y por el mismo tipo de inestabilidades, se rompa al llegar al confín de la galaxia. En ese momento el material del viento hallará libre el camino para adentrarse en el medio intergaláctico.

GUILLERMO TENORIO TAGLE, CASIANA MUÑOZ TUÑON, VERONICA MELO Y SERGIY SILICH



6. ONDAS DE CHOQUE OBLICUAS Y CRUZADAS. Cuando se encuentran con un obstáculo, los flujos supersónicos producen una onda de choque de sentido inverso, que se enfrenta al flujo y lo termaliza; con otras palabras, cuando cruza el gas convierte su energía cinética en energía térmica. Con una onda de choque plana la termalización es total. Ante una onda oblicua, si presenta un ángulo con respecto al flujo supersónico, termalizará únicamente la componente de la velocidad perpendicular al choque, mientras que la componente paralela al choque se conservará. Así, el gas que recibe la onda de choque, parcialmente termalizado, se desvía hacia la onda. En el punto de intersección entre dos ondas de choque oblicuas se forma un flujo supersónico convergente, que da lugar a la formación de nuevas ondas de choque, en este caso ondas de choque cruzadas. A su vez, las ondas de choque cruzadas sólo termalizan la componente de la velocidad del fluido perpendicular al choque, mientras que la componente paralela se transmite íntegra. Así, un conjunto de ondas de choque oblicuas y cruzadas lleva inevitablemente a la autocolimación del flujo incidente.

lómetros por segundo. Hay un supercúmulo central y los otros dos se encuentran a 180 y 270 años luz de distancia, todos ellos con una dimensión total de quince años luz de radio, alojados en el mismo plano de la galaxia. Las distancias supuestas entre los cúmulos estelares, aunque arbitrarias, permiten que los vientos enfríen sus temperaturas centrales, superiores a los diez millones de grados, a menos de los diez mil grados kelvin, antes de estrellarse supersónicamente con el viento proveniente del vecino más próximo.

Esta distribución de tamaños y distancias permite realizar también los cálculos numéricos en una malla computacional bien resuelta (con una resolución espacial inferior a un año luz) y, por ende, hallar la solución física de la interacción. Dado que los vientos son inicialmente isótropos, una interacción frontal ocurre sólo sobre el plano que define su posición. Los flujos incidentes a cualquier otra altura por encima de ese plano impactarán tendiendo un ángulo; darán lugar a la aparición inmediata de ondas de choque de sentido inverso oblicuas y a una zona de alta presión entre ellas.

Los choques oblicuos tienen la propiedad de termalizar únicamente la componente de la velocidad del flujo incidente perpendicular a la onda de choque. De ese modo, obligan al gas que ha cruzado la onda de choque a deslizarse por detrás de ella con una velocidad igual al valor de la componente de su velocidad de incidencia paralela al choque. Así, la presión y la temperatura alcanzan sus valores máximos en la base del plano de interacción, ahí donde las ondas de choques de sentido inverso son perpendiculares al flujo incidente. El gas de alta presión fluye entonces a regiones de menor presión y, junto al enfriamiento radiativo, define el grosor de las zonas de alta presión detrás de las ondas de choque de sentido inverso.

El enfriamiento radiativo ocurre en cada parcela de gas a una tasa que viene definida por los valores locales de su densidad, temperatura y metalicidad. Si por alguna de estas razones el enfriamiento por radiación es, al menos transitoriamente, despreciable, la región de alta presión ha de empujar las ondas de choques de sentido inverso hacia los flujos incidentes para que adquieran presto una posición estacionaria, mientras que el flujo, como un todo, toma una configuración estable que ha de perdurar mientras los vientos isótropos continúen inyectándose.

Si el enfriamiento por radiación es rápido, también se alcanzará una configuración estable y las ondas de choque de sentido inverso encontrarán su posición estacionaria. Sin embargo, en este caso, la pérdida de temperatura por radiación ha de ser compensada por la condensación del gas que ha recibido el choque, para mantener la misma presión. Este requerimiento hidrodinámico causa que la zona de alta presión, detrás de las ondas de choque de sentido inverso, colapse y se transforme en delgados y fríos filamentos. La mayor pérdida de temperatura por radiación ocurre en la base del plano de interacción, donde al ser mayor la densidad se favorece el enfriamiento; así, las densas estructuras son lanzadas con velocidades de varios cientos de kilómetros por segundo y, en cuestión de un millón de años, alcanzan alturas de miles de años luz. Estos densos y fríos filamentos son, aun a grandes distancias, blanco fácil de la radiación ultravioleta producida también por los supercúmulos estelares y, por tanto, serán continuamente fotoionizados. Nótese que los vientos libres interceptan estas estructuras, incluso muy lejos de su origen; se espera, pues, que aparezcan inmersas en una emisión de rayos X blandos (de baja energía).

Las ondas de choque oblicuas termalizan sólo parcialmente la energía cinética de los flujos divergentes. Esa es la razón de que haya una emisión considerable en rayos X blandos, aun a grandes distancias (miles de años luz) del plano de la galaxia. Detrás de las ondas de choque el enfriamiento por radiación se ve acelerado por la alta metalicidad del gas, particularmente en las regiones de mayor densidad. Ello conlleva la condensación del gas que ha sufrido el choque y el consiguiente desarrollo de una red de filamentos densos y fríos que surgen de la base misma del plano de interacción y que miden miles de años luz en la dirección perpendicular. En la estructuración de los filamentos diversas inestabilidades entran en juego; causan el ensanchamiento de la estructura filamentosa, que a su vez permite su interacción con el viento libre aun a grandes distancias por encima del plano galáctico. Dichas interacciones favorecen la aparición de zonas emisoras en rayos X que envuelven las densas estructuras a medida que el flujo alcanza grandes distancias por encima del plano galáctico.

De nuestros resultados queda claro una intrincada morfología, observable en rayos X y en el espectro óptico y

GUILLERMO TENORIO TAGLE. CASIANA MUÑOZ TUÑON, VERONICA MELO Y SERGIY SILICH

originada en virtud de la interacción entre múltiples vientos. En proyección esa estructura parece ocupar el mismo volumen en esos dos intervalos de espectro electromagnético. Las interacciones establecen un sinnúmero de ondas de choque oblicuas, que permanecerán estacionarias mientras los supercúmulos estelares inyecten sus vientos. Al mismo tiempo, el enfriamiento radiativo promueve la condensación del viento sometido a la onda de choque y lo configura en filamentos.

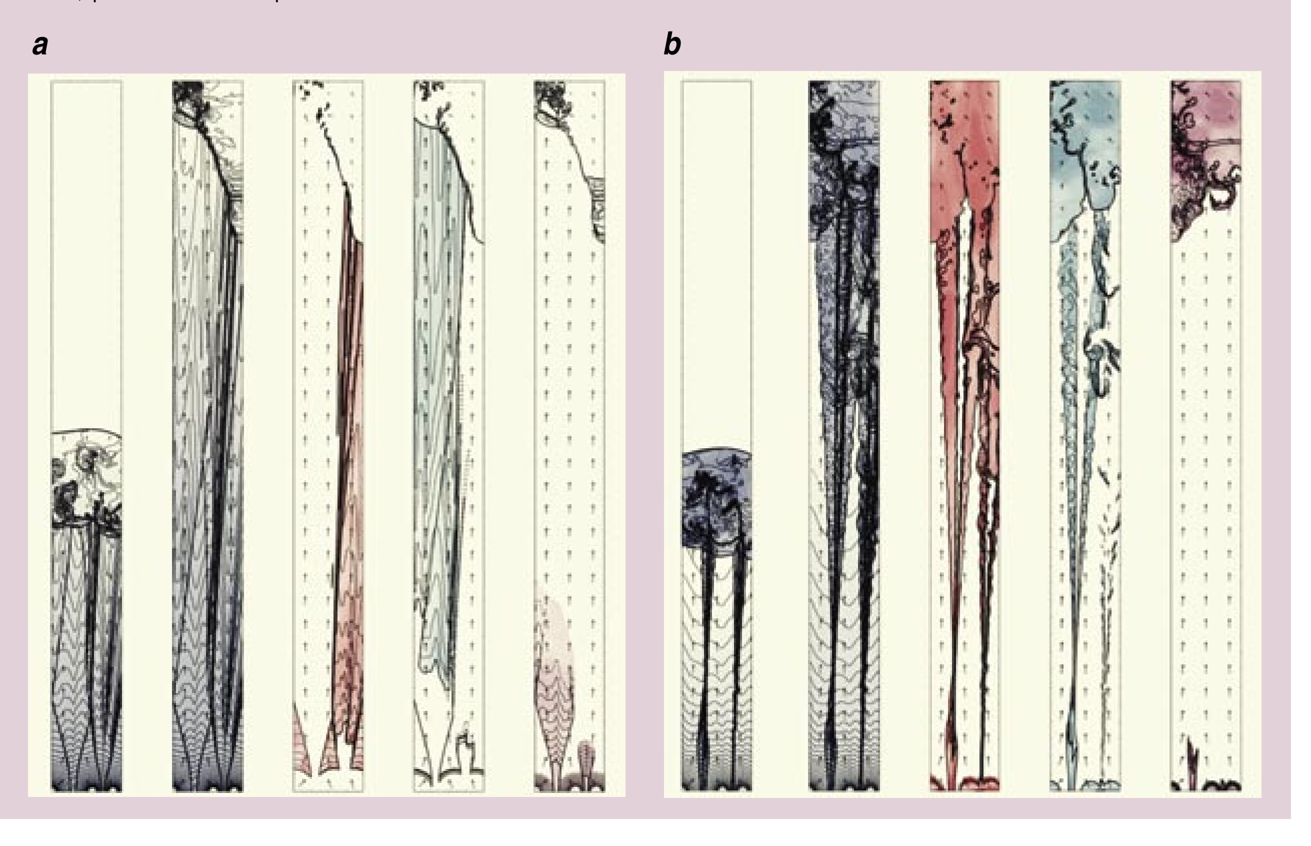
La intersección entre múltiples ondas de choque oblicuas origina también la aparición de ondas de choque cruzadas, capaces de colimar los flujos divergentes de cada supercúmulo estelar en una corriente perpendicular al plano que define su distribución espacial. Esta autocolimación es muy diferente a la supuesta antes, al explicar los supervientos galácticos, que requería de toros o conos o densas paredes colimadoras generadas en el disco galáctico para confinar el flujo supernóvico. Las estructuras calculadas crecen hasta medir varios miles de años luz en tiempos de evolución del orden del millón de años; se desplazan, perfectamente colimadas, con velocidades de cientos de kilómetros por segundo, velocidades que exceden la velocidad de escape de las galaxias de mayor masa conocidas. La interacción de múltiples vientos producidos por múltiples supercúmulos estelares establece y estructura los supervientos galácticos, flujos poderosos de material procesado.

Nuestros cálculos añaden una serie de nuevos parámetros que deben considerarse: número de supercúmulos presente en un brote masivo de formación estelar; posición o distribución espacial de los supercúmulos; intensidad de la formación estelar en cada supercúmulo, que define la energética, y edad de los super-

La autocolimación de los vientos galácticos, según un modelo informático

LOS DIFERENTES PANELES de la serie *a*, con dimensiones de 300 × 3000 años luz de tamaño, muestran densidades y velocidades, o temperaturas y velocidades, a lo largo de la malla computacional para diferentes estadios de la evolución del viento. Los dos primeros ofrecen contornos de isodensidad del material (con una separación logarítmica $\Delta = 0{,}1$), así como el campo de velocidades, cuyo valor en cada punto se deduce proporcionalmente de la mayor flecha de cada panel, que representa mil kilómetros por segundo. Los tiempos de evolución para estos dos primeros paneles son $4{,}17 \times 10^5$ y $1{,}25 \times 10^6$ años. En los tres últimos paneles se representa la temperatura del gas en el rango de 10^4-10^5, 10^5-10^6 y 10^6-10^7 K, para el último tiempo calculado. En este cálculo se ha supuesto que el gas inyectado tiene una metalicidad igual a tres veces el valor solar.

Los paneles de la serie *b* presentan los resultados de un segundo cálculo, donde la metalicidad del gas inyectado decuplicó la metalicidad solar. Los tiempos de evolución son: $4{,}82 \times 10^5$ y $1{,}39 \times 10^6$ años. Nótese que en los cálculos de las series *a* y *b* se emplearon tres supercúmulos estelares, todos ellos dotados de pareja energía (10^{41} erg/s) y situados en idénticas posiciones. La gran diferencia entre los dos resultados deriva del exacerbado enfriamiento, consecuencia de la mayor metalicidad; el enfriamiento lleva a que en este segundo caso el gas sometido a la onda de choque colapse en forma de finos filamentos.



GUILLERMO TENORIO TAGLE. CASIANA MUÑOZ TUÑON, VERONICA MELO Y SERGIY SILICH

cúmulos considerados, que influye en la metalicidad de sus vientos. Todos éstos son parámetros relevantes nuevos, que definen una multitud de condiciones iniciales y de frontera en el estudio del medio interestelar de diferentes galaxias; parámetros nuevos que llevan a la redistribución del material eyectado y modifican la estructura interna de superburbujas y supervientos galácticos.

M82 en su danza de galaxias

¿Cómo se desencadenó el brote espectacular de formación de estrellas en el núcleo de M82? Entre los requerimientos básicos para dar lugar a un estallido de formación estelar se encuentra, ante todo, la enorme cantidad de gas que ha de transformarse en estrellas. También, la rapidez con la que el gas tiene que hacerse disponible, para así apantallarse y evitar que lo dispersen la acción o energética de las estrellas en formación. Todo ello ha de ocurrir en un volumen de unas cuantas centenas de años luz de radio, insignificante comparado con las dimensiones de la galaxia progenitora.

Los caminos más sencillos para cumplir con estas condiciones básicas de tamaño, masa y tiempo apuntan a una alteración brusca del potencial gravitatorio de la galaxia progenitora. Ello puede ocurrir ya sea por una interacción directa o por el paso cercano de otras galaxias. Dichas interacciones originan una rápida transferencia de momento angular hacia las regiones exteriores que hace que material del disco se desplome hacia el núcleo galáctico. También se ha sugerido una inyección repentina y sustancial de gas proveniente de otras galaxias. Ambas posibilidades parecen estar contribuyendo al desmesurado episodio de formación estelar en el núcleo de M82. Esta galaxia, al igual que NGC3077 y NGC2976, forma parte del grupo de galaxias que evolucionan mientras orbitan alrededor de la enorme espiral M81. La emisión en hidrógeno neutro del grupo, captada a través de la línea de 21 cm, ha constatado la multiplicidad de masivos remolinos y corrientes gaseosas que se han desprendido de sus galaxias para formar enormes puentes intergalácticos; a través de ellos se transfieren ingentes cantidades de gas entre las galaxias. Todo ello como resultado de la fuerza de marea causada por la interacción gravitatoria entre las galaxias del grupo.

En el caso de M82, la violenta precipitación del material de su propio disco hacia el núcleo galáctico ha tenido tiempo suficiente para generar unidades de formación estelar, nuevos y masivos supercúmulos estelares; en su mayoría conforman un plano preferencial bien alineado con el plano principal del disco de la galaxia. Los otros miembros del grupo de M81, más cercanos a la gran espiral, no tendrán más que esperar a que se dispare en sus núcleos la formación estelar para convertirse, en caso de que originen múltiples grupos estelares, en nuevos ejemplos de supervientos galácticos.

¿Adónde van los supervientos galácticos? El superviento galáctico de M82, conocido gracias a las más detalladas observaciones en una multiplicidad de frecuencias, resulta de la proximidad entre los múltiples y masivos brotes de formación estelar presentes en su núcleo. Tal proximidad permite que los vientos se estrellen entre sí, dando lugar al acoplamiento que promueve la estructura y el alto grado de colimación, que a su vez ocasiona que con gran velocidad puedan alejarse de su galaxia progenitora. No cabe la menor duda de que el material recién procesado por las estrellas de M82 se ha librado del potencial gravitatorio de su galaxia y escapa libre hacia el medio intergaláctico.

Ignoramos aún si el superviento de M82 posee fuerza suficiente para escapar también a la atracción gravitatoria que crea como un todo el grupo entero de galaxias, de forma que llegue a contaminar el espacio entre otros grupos y cúmulos de galaxias. De no ser así quedará atrapado y sólo produciría una contaminación local dentro del grupo de galaxias de M81. Esta última posibilidad es inevitable en el caso de grandes grupos o cúmulos de galaxias, que pueden llegar a contar hasta con varios miles de miembros. Cuando tal acontece, los supervientos galácticos del tipo del de M82 explican, por lo menos parcialmente, el alto contenido en metales presente en el medio intracumular. En parte, pues, sabemos que otros fenómenos despojan también a una galaxia de su medio interestelar; de ese modo, aportan metales que hayan podido generar a la contaminación del medio intracumular. Entre los fenómenos en cuestión, sobresalen dos: que la galaxia se destruya al chocar con otras del mismo cúmulo o que sufra, dada su velocidad orbital, una presión del medio intergaláctico que le arranque parte de su material.

Los autores

Guillermo Tenorio Tagle, Casiana Muñoz Tuñón y **Sergey Silich** han desarrollado una larga colaboración internacional para el estudio de la formación estelar violenta y su impacto con el medio interestelar. Se han ocupado de los aspectos teóricos y observacionales. **Verónica Melo** se ha unido recientemente al equipo y ha desarrollado su tesis doctoral en el Instituto de Astrofísica de Canarias sobre el censo de cúmulos estelares masivos en galaxias vecinas. Muñoz Tuñón es investigadora del IAC y Tenorio Tagle y Silich pertenecen al Instituto Nacional de Astrofísica, Optica y Electrónica de Puebla).

Bibliografía complementaria

TIGHTLY CORRELATED X-RAY/HA-EMITTING FILAMENTS IN THE SUPERBUBBLE AND LARGE-SCALE SUPERWIND OF NGC 3079. G. Cecil, J. Bland-Hawthorn y S. Villeux en *The Astrophysical Journal*, vol. 576, pág. 745; 2002.

ON THE RAPIDLY COOLING INTERIOR OF SUPERGALACTIC WINDS. Sergiy Silich, Guillermo Tenorio-Tagle y Casiana Muñoz-Tuñón en *Astrophyysical Journal*, vol. 590, pág. 791; 2003.

SUPERGALACTIC WINDS DRIVEN BY MULTIPLE SUPER-STAR CLUSTERS. Guillermo Tenorio-Tagle, Sergiy Silich y Casiana Muñoz-Tuñón en *Astrophysical Journal*, vol. 597, pág. 279; 2003.

YOUNG SUPER STAR CLUSTERS IN THE STARBURST OF M82: THE CATALOGUE. Verónica Melo, Casiana Muñoz-Tuñón, Jesús Maiz-Apellániz y Guillermo Tenorio-Tagle en *Astrophysical Journal*, vol. 619, pág. 270; 2005.

Nueva perspectiva para la enfermedad de Parkinson

Los últimos descubrimientos genéticos y celulares permitirán desarrollar mejores tratamientos para este trastorno del sistema nervioso, cuya incidencia es cada vez mayor

Andrés M. Lozano y Suneil K. Kalia

La enfermedad de Parkinson, descrita en los albores del siglo XIX por el médico británico James Parkinson como una "parálisis temblorosa", se cuenta entre los trastornos neurológicos de mayor incidencia. Según fuentes de las Naciones Unidas, la padecen al menos 4 millones de personas en todo el mundo; en EE.UU., el número de afectados se estima entre 500.000 y un millón, y se diagnostican 50.000 casos cada año. Las previsiones para 2040 indican que estas cifras se habrán duplicado, debido al envejecimiento de la población; de hecho, la enfermedad de Parkinson y otros trastornos neurodegenerativos frecuentes entre los ancianos (como el Alzheimer y la esclerosis lateral amiotrófica) van camino de superar al cáncer como primera causa de muerte. Pero la enfermedad no es exclusiva de las personas mayores: el 50 por ciento de los pacientes la sufren a partir de los 60 años; la otra mitad, antes. Las mejoras en el diagnóstico han revelado que la enfermedad afecta incluso a personas menores de 40 años.

Se desconoce la forma de atenuar, interrumpir o prevenir la enfermedad de Parkinson. Aunque existen tratamientos (farmacológicos o basados en la estimulación profunda del cerebro), éstos alivian sólo los síntomas, no las causas. Con todo, en los últimos años se han producido avances alentadores. Descubrimientos sobre las bases génicas de la enfermedad y su relación con ciertas disfunciones proteínicas infunden un renovado optimismo ante la posibilidad de abrir nuevas vías terapéuticas.

Tal y como su denominación decimonónica sugiere, la enfermedad se caracteriza por trastornos de la motricidad: temblor de manos, brazos y otras zonas del cuerpo, rigidez de las extremidades, lentitud de movimiento y alteraciones en el equilibrio y la coordinación. Algunos pacientes tienen problemas también para andar, hablar, dormir, orinar y mantener relaciones sexuales.

El origen de estos trastornos se halla en la muerte de neuronas, que afecta al cerebro y, de modo particular, a las neuronas que producen dopamina (un neurotransmisor) en la sustancia negra. Estas neuronas dopaminérgicas son componentes fundamentales de los ganglios basales, un complejo circuito ubicado en la zona profunda del cerebro que coordina y afina los movimientos.

Al principio, conforme se van perdiendo las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra, el cerebro sigue operando con normalidad, a pesar de la incapacidad para sustituir las células muertas. Pero cuando han desaparecido la mitad o más de tales células especializadas, el cerebro no alcanza a cubrir su función. Desde ese instante, el déficit neuronal provoca el mismo efecto en el organismo que la pérdida del control de tráfico aéreo en un aeropuerto. Retrasos, despegues abortados y cancelaciones dominan la escena cuando las estructuras del cerebro implicadas en el control motor (tálamo, ganglios basales y corteza cerebral) dejan de operar como una unidad integrada y orquestada.

Proteínas aberrantes

En muchas de las autopsias realizadas a enfermos de Parkinson, el daño se observa en forma de amasijos de proteínas en el interior de las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra. Estas masas proteicas aparecen también en la enfermedad de Alzheimer y en la enfermedad de Huntigton, pero en el caso de la enfermedad de Parkinson reciben el nombre de cuerpos de Lewy, en referencia al patólogo alemán que los descubrió en 1912. ¿Son estos amasijos proteicos los causantes de la destrucción neuronal o, por el contrario, su efecto "limpiador"

JEFF JOHNSON *Hybrid Medical Animation*



de moléculas tóxicas resulta protector? Aunque se trata de una cuestión controvertida, los expertos coinciden en que estas acumulaciones de proteínas resultan clave para comprender la enfermedad de Parkinson.

Dos procesos celulares ocupan un destacado lugar en esta exposición emergente: el plegamiento y la eliminación de proteínas. Las células sintetizan proteínas (cadenas de aminoácidos) a partir de las instrucciones escritas en el ADN de sus genes. A medida que avanza la síntesis, las chaperonas cumplen un doble cometido: pliegan las proteínas en la conformación que les corresponde y se encargan de forzar de nuevo el plegamiento de proteínas que han sufrido un proceso de desnaturalización.

Si por alguna razón el sistema de chaperonas falla, las proteínas (nacientes o desnaturalizadas) que por sí solas no alcanzan su conformación

nativa acaban marcadas para su eliminación por el sistema ubiquitina-proteosoma. En primer lugar, la ubiquitina, una proteína de tamaño reducido, se une a la proteína con conformación defectuosa mediante un proceso de ubiquitinación. Este marcaje se repite hasta que la proteína malograda queda cubierta por cadenas de ubiquitina de longitud variable. Como un beso de la muerte, estas cadenas advierten al proteosoma, un sistema de eliminación de residuos, de la existencia de la proteína "señalada". Por fin, el proteosoma la digiere hasta descomponerla en aminoácidos. En 2004, Aaron Ciechanover y Avram Hershko, del Instituto de Tecnología Technion-Israel, e Irwin Rose, de la Universidad de California en Irvine, recibieron el premio Nobel de química por sus trabajos sobre la determinación de este sistema.

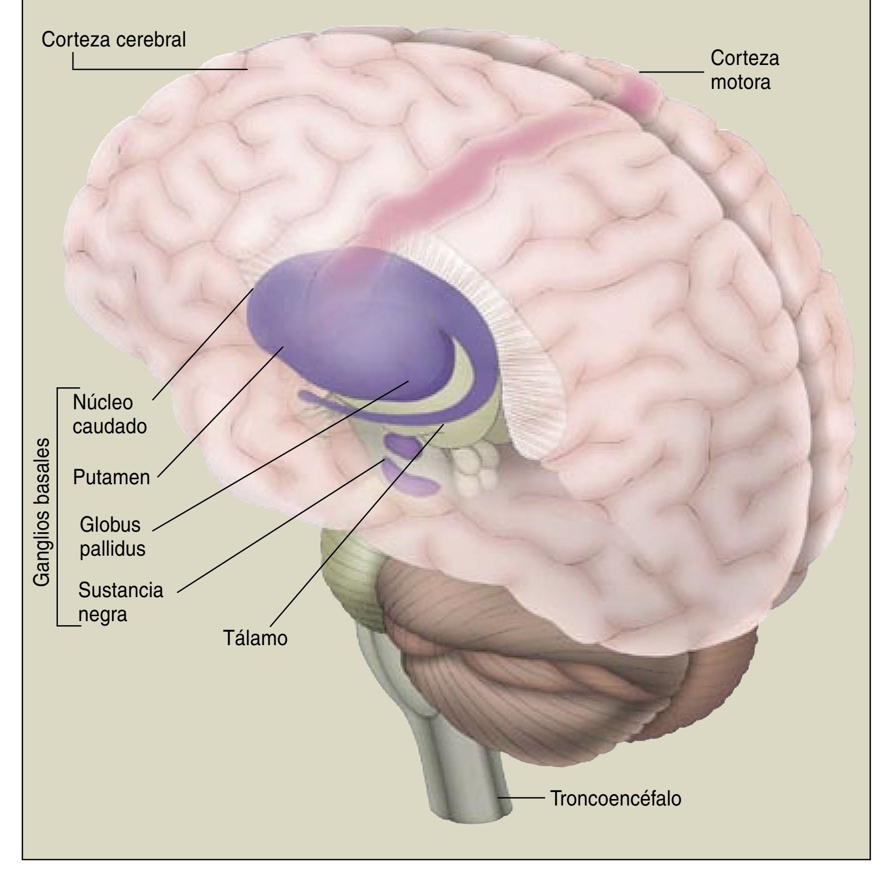
En los últimos años, ha ganado aceptación la hipótesis de que la enfermedad de Parkinson surge cuando fracasan los sistemas de chaperonas y ubiquitina-proteosoma. En el marco de esa explicación, se da algún tipo de lesión en las neuronas de la sustancia negra que desencadena una cascada de procesos de estrés celular [*véase* "La enfermedad de Parkinson", por Moussa B. H. Youdim y Meter Riederer, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, marzo de 1997]. El estrés provoca la desnaturalización de abundante cantidad de proteínas, que forman agregados. En principio, estos cúmulos ofrecerían protección, ya que amontonan todas las proteínas aberrantes, evitando así que causen problemas en otro lugar de la célula. A continuación, las chaperonas se ocupan de restablecer el plegamiento y el sistema de eliminación comienza a destruir las proteínas que no logran recuperar su conformación nativa. Sin embargo, cuando la desnaturalización supera la capacidad de la célula para reparar las proteínas "descarriadas" surgen los problemas: el sistema ubiquitina-proteosoma se bloquea, las chaperonas desaparecen y las proteínas tóxicas se acumulan. A ello sigue la muerte de la neurona.

Los partidarios de esta hipótesis sostienen que podría explicar las dos formas de la enfermedad de Parkinson: la esporádica y la heredada. Se estima que el 95 por ciento de los pacientes padecen la forma esporádica, como resultado de una compleja interacción entre los genes y el entorno. Cuando alguien con un trasfondo genético susceptible se enfrenta a plaguicidas, contaminantes u otros factores ambientales, las células de la sustancia negra sufren un mayor estrés y acumulan un mayor número de proteínas aberrantes que el sujeto exento.

En el 5 por ciento restante de los pacientes, la enfermedad de Parkin-

EL CEREBRO CON PARKINSON

La muerte neuronal ocurre, sobre todo, en la sustancia negra, región que controla el movimiento voluntario y ayuda a regular el estado de ánimo. Aunque, al principio, el resto del cerebro la compensa, deja de hacerlo cuando se ha perdido entre el 50 y el 80 por ciento de las neuronas de la sustancia negra. Llegados a este punto, otras partes del cerebro implicadas en el control motor, incluidos el resto de los ganglios basales (de los que forma parte la sustancia negra), el tálamo y la corteza cerebral, dejan de operar como una unidad integrada y orquestada. Los movimientos del individuo se tornan inconexos e incontrolables.



SARA CHEN

Resumen/Proteómica de la enfermedad de Parkinson

- No se conoce la manera de atenuar, interrumpir o prevenir la enfermedad de Parkinson, uno de los trastornos neurológicos más extendidos. Los dos tratamientos al uso, el farmacológico y el quirúrgico, se limitan a reducir los síntomas.
- Descubrimientos recientes sobre disfunciones proteínicas y fundamentos génicos de la enfermedad de Parkinson han abierto nuevas vías terapéuticas.
- Los fallos en el sistema de plegamiento de las proteínas y en el de eliminación de residuos parecen causar la enfermedad. Se han puesto de manifiesto las alteraciones génicas que subyacen bajo tales trastornos.

son parece estar controlada casi exclusivamente por la genética. Los descubrimientos de los últimos ocho años han puesto de manifiesto que la acumulación de proteínas defectuosas y los fallos en la maquinaria de protección de la célula están relacionados con mutaciones génicas. Se trata de los avances más apasionantes que se han producido en este campo en los últimos años.

La frontera genética

En 1997, el equipo que dirige Mihael H. Polymeropoulos, del norteamericano Instituto Nacional de la Salud, identificó una mutación del gen que codifica la proteína alfa-sinucleína en familias italianas y griegas que padecían una forma heredada de la enfermedad de Parkinson. Se trata de una mutación autosómica dominante, lo que quiere decir que una única copia (bien de la madre, bien del padre) desencadena la enfermedad. Las mutaciones en el gen *alfa-sinucleína* son extremadamente raras e insignificantes si consideramos la cifra total de enfermos de Parkinson en el mundo (representan menos del 1 por ciento de los afectados), pero la identificación de una conexión entre la proteína codificada y la enfermedad de Parkinson ha originado una explosión de actividad investigadora (en parte, porque poco después se descubrió que la alfa-sinucleína, normal o mutada, estaba presente en los cúmulos proteicos).

Una mejor comprensión de cómo la mutación da lugar a la enfermedad de Parkinson arrojará luz, así se espera, sobre el mecanismo que subyace bajo la formación de cuerpos de Lewy en las células productoras de dopamina de la sustancia negra de pacientes con la forma esporádica de la enfermedad.

El gen *alfa-sinucleína* codifica una proteína de sólo 144 aminoácidos de longitud. Se sospecha que ésta interviene en la comunicación interneuronal. Su secuencia aminoacídica sufre leves alteraciones originadas por mutaciones (dos de ellas promueven el cambio de un único aminoácido en la cadena). Estudios realizados en la mosca de la fruta, nemátodos (gusanos cilíndricos) y ratones han demostrado que la producción de grandes cantidades de alfa-sinucleína mutada provoca la degeneración de las neuronas dopaminérgicas y déficits motores.

Otros trabajos han revelado que la alfa-sinucleína mutada no se pliega correctamente y se acumula en el interior de los cuerpos de Lewy. La alfa-sinucleína alterada inhibe también el sistema ubiquitina-proteosoma y resiste a la degradación por parte del proteosoma. Además, en fecha reciente se ha demostrado que la presencia de un exceso de copias del gen *alfa-sinucleína* normal causa la enfermedad de Parkinson.

En 1998, un año después del descubrimiento de la mutación del gen *alfa-sinucleína*, Yoshikuni Mizuno, de la Universidad de Juntendo, y Nobuyoshi Shimizu, de la Universidad de Keio, identificaron un segundo gen, *parkina*, que aparece mutado en otra variante heredada de la enfermedad de Parkinson. Esta mutación se observa con mayor frecuencia en los individuos diagnosticados antes de los 40 años; cuanto menor es la edad a la que se manifiesta, mayor es la probabilidad de que la enfermedad se deba a una mutación de *parkina*. Aunque las personas que heredan una copia defectuosa de ambos progenitores (mutación autosómica recesiva) desarrollan la enfermedad inevitablemente, quienes portan una sola copia del gen mutado pertenecen, a su vez, al grupo de mayor riesgo. Aunque no disponemos de datos fiables sobre incidencia, las mutaciones de *parkina* parecen ser más frecuentes que las de *alfa-sinucleína*.

La proteína cifrada, parkina, contiene un conjunto de secuencias de aminoácidos, o dominios, comunes a un gran número de proteínas. Dos de ellos, los dominios RING, merecen especial atención: las proteínas que

CAUSAS AMBIENTALES

Durante decenios se barajó la hipótesis de que la enfermedad de Parkinson podría deberse a algún factor ambiental. Sin embargo, no se demostró hasta principios de los años ochenta del siglo pasado, cuando J. William Langston, del Instituto Parkinson de Sunnyvale en California, estudió un grupo de drogadictos del área de la bahía de San Francisco, que a los pocos días de haber consumido "China white", una heroína sintética, habían desarrollado síntomas característicos de la enfermedad de Parkinson. Resultó que el lote contenía impurezas de MPTP, un compuesto que mata a las neuronas de la sustancia negra, una región del cerebro. Mediante tratamiento, algunos de los "drogadictos alelados" —así se les llamó— recuperaron cierto control de la motricidad; la mayoría, sin embargo, sufrieron una parálisis irreversible.

En los años siguientes, los expertos buscaron otros compuestos con efectos similares. En 2003, su trabajo cobró nuevo impulso cuando el estadounidense Instituto Nacional de Ciencias de la Salud Ambiental destinó 20 millones de dólares a los proyectos de identificación e investigación de las causas ambientales de la enfermedad de Parkinson. Hasta la fecha, estudios epidemiológicos y con animales han relacionado algunos casos de Parkinson con un alto grado de exposición a varios plaguicidas, herbicidas y fungicidas, entre ellos el paraquat y el maneb. A través de ensayos sobre animales, J. Timothy Greenamyre, de la Universidad de Emory, ha descubierto que la exposición a la rotenona, un plaguicida de uso común en la agricultura orgánica porque se obtiene a partir de productos naturales, puede provocar la agregación de proteínas, matar a las neuronas dopaminérgicas, inhibir los orgánulos celulares productores de energía y dar lugar a déficits motores.

Del mismo modo que algunos agentes desencadenan la enfermedad de Parkinson, otros podrían ofrecer protección. Hoy se admite que el consumo de tabaco y café aporta cierto grado de protección, aunque está claro que los riesgos del tabaquismo rebasan con mucho esta particular ventaja.



ALGUNOS PLAGUICIDAS, incluido uno de los que se emplean en la agricultura biológica, provocan la enfermedad de Parkinson en animales.

ANNIE GRIFFITHS BELT *Corbis*

TERAPIAS ACTUALES

Dos enfoques, el farmacológico y el quirúrgico, subyacen bajo el tratamiento actual de la enfermedad de Parkinson. Ambos producen notables mejoras pero conllevan también efectos adversos, razón por la cual médicos y pacientes esperan ansiosos el desarrollo de nuevas vías terapéuticas.

FARMACOS

Los tratamientos principales se basan en la administración de fármacos miméticos de la dopamina, precursores de la dopamina (como la levodopa) o inhibidores de la degradación de la dopamina. Otros actúan sobre algunos de los sistemas no dopaminérgicos afectados por la enfermedad de Parkinson, incluidos los sistemas mediados por acetilcolina y glutamato. Muchos medicamentos resultan eficaces durante las fases iniciales de la enfermedad, pero su uso continuado acarrea problemas. Entre los efectos adversos observados a largo plazo, el de mayor importancia es la alternancia impredecible entre períodos con motricidad normal y periodos con parálisis, temblores y rigidez. Además, algunos fármacos provocan contorsiones involuntarias (disquinesias) discapacitantes y llamativas en pacientes jóvenes.

ESTIMULACION PROFUNDA DEL CEREBRO

En los albores del siglo pasado, se descubrió que la destrucción de algunas células en las rutas motoras del cerebro reducía los temblores asociados a la enfermedad de Parkinson. Aunque el procedimiento provocaba con frecuencia debilidad muscular, los pacientes la preferían a los temblores. Más tarde, en 1938, se observó que la lesión de los ganglios basales aportaba a los enfermos de Parkinson mejoras todavía más notables. Parecía que la eliminación de las células que no operaban de forma correcta (las que no liberaban sustancias o las liberaban en demasía) facilitaba el funcionamiento normal del resto del cerebro. Pero la inducción de lesiones no constituía la solución perfecta: si no se producían en el lugar preciso o si afectaban a ambos hemisferios, infligían graves daños, alterando el habla y las facultades cognitivas.

En los años setenta, se descubrió que la estimulación eléctrica de alta frecuencia de ciertas regiones del cerebro producía los mismos beneficios que las lesiones y no comportaba efectos secundarios. En la actualidad se utilizan varias formas de estimulación profunda del cerebro en el tratamiento de trastornos neurológicos [véase "Estimulación cerebral" por Mark S. George; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 2003]. A los enfermos de Parkinson, se les implanta un electrodo en uno de los dos ganglios basales (el *globus pallidus* o el núcleo subtalámico) y se conecta a un marcapasos instalado en el tórax (*abajo*). El marcapasos descarga pulsos eléctricos de tres volt y 90 milisegundos a un ritmo de hasta 185 pulsos por segundo; debe ser reemplazado cada cinco años.

Según los pioneros de la técnica, Alim Louis Benabid y Pierre Pollak, de la Universidad de Grenoble, esta estimulación reduce de forma drástica los temblores y la rigidez. De hecho, en el transcurso de los últimos diez años se ha convertido en uno de los pilares terapéuticos; se estima que unos 30.000 pacientes se han sometido a este tratamiento quirúrgico. Algunos han logrado reducir las dosis medicamentosa; otros han abandonado la medicación. Con todo, la estimulación profunda del cerebro no evita el progreso de la enfermedad ni alivia las alteraciones cognitivas, lingüísticas y motrices que puedan surgir.

A pesar del éxito de la estimulación profunda del cerebro, quedan pendientes numerosas cuestiones. ¿Cuál es la mejor diana, el *globus pallidus* o el núcleo subtalámico? Añádase el desconocimiento de los mecanismos eléctricos y químicos que hacen que los pulsos eléctricos provoquen mejoras en la enfermedad de Parkinson. Además, muchos de los datos son contradictorios; así, creíase que la estimulación profunda del cerebro operaba del mismo modo que las lesiones, es decir, inactivando células, pero se ha descubierto que lo que hace es acelerar la descarga de impulsos nerviosos.

SARA CHEN

los contienen participan en la ruta proteolítica. A tenor de los datos experimentales, en esta forma heredada de la enfermedad de Parkinson la muerte neuronal se debe, en parte, al fallo del componente de ubiquitinación que participa en el sistema de eliminación de proteínas (si la parkina no engarza ubiquitina a las proteínas aberrantes no hay marcaje y, por tanto, no hay eliminación). Nuestros propios trabajos indican que la proteína BAG5, que se encuentra en los cuerpos de Lewy, se une a parkina para inhibir su función y provocar la muerte de las neuronas productoras de dopamina.

Algunos pacientes con mutaciones en el gen *parkina* carecen de cuerpos de Lewy en las neuronas de la sustancia negra. Este dato reviste especial interés, pues sugiere que las proteínas sólo pueden formar tales agregados cuando el proceso de ubiquitinación opera correctamente. Señala también que, cuando las proteínas dañinas no se encuentran confinadas en el interior de los cuerpos de Lewy, se origina un caos celular. El hecho de que los pacientes con mutaciones en *parkina* desarrollen la enfermedad a una edad precoz parece indicar que carecen de la protección inicial conferida por la reclusión de las proteínas tóxicas en los cúmulos.

Varios hallazgos recientes revelan alteraciones génicas que arruinan la maquinaria celular. En 2002, Vincenzo Bonifati y su grupo, del Hospital Erasmus de Rotterdam, identificaron una mutación del gen *DJ-1* en familias holandesas e italianas. Lo mismo que la de *parkina*, esta mutación es responsable de una variante autosómica recesiva de la enfermedad de Parkinson. Se han descubierto mutaciones en otro gen, *UCHL1*, en pacientes con variantes heredadas de la enfermedad de Parkinson. Asimismo, se ha descrito una mutación en el gen *PINK1* que podría originar el fallo metabólico y la muerte neuronal en la sustancia negra. Otra investigación ha identificado en pacientes del País Vasco un gen, *LRRK2*, que codifica la proteína dardarina ("dardara" significa "temblor" en vasco); también

está implicada en el metabolismo y aparece en variantes heredadas de la enfermedad de Parkinson. Con todo, todavía nos hallamos lejos de comprender exactamente qué tipo de fallos se derivan de todas estas mutaciones.

Nuevas vías terapéuticas

Las diversas incursiones que acabamos de describir se refieren a moléculas cuya actividad podría alterarse o remedarse mediante fármacos, evitando así la muerte celular. Estas terapias no se limitarían a paliar los síntomas, sino que frenarían la degeneración neuronal responsable del avance de la enfermedad.

Desde este enfoque terapéutico se han cosechado dos resultados de reseñable interés. Se ha descubierto que, en animales, un aumento de los niveles de chaperonas en las células de la sustancia negra protege contra la neurodegeneración iniciada por la alfa-sinucleína mutada. La investigación reciente sobre modelos de la enfermedad de Parkinson en la mosca de la fruta ha revelado que los fármacos que estimulan la actividad de las chaperonas ofrecen protección contra la neurotoxicidad. Quizás algún día se desarrollen fármacos de tipo chaperonas que limiten la degeneración neuronal en humanos o se diseñe una terapia génica que inste la síntesis de cuantas chaperonas se necesiten. Se ha descubierto que un aumento de la parkina normal protege contra la neurodegeneración provocada por las proteínas desnaturalizadas. No obstante, harán falta muchos más estudios para comprobar la eficacia de tales tratamientos en humanos.

Además de seguir las pistas esbozadas por los nuevos descubrimientos sobre genes y proteínas, los expertos han comenzado a ensayar la introducción en el cerebro de factores neurotróficos (compuestos que promueven el crecimiento y diferenciación de las neuronas). Estos agentes no sólo alivian los síntomas, sino que prometen también proteger a las neuronas frente a posibles lesiones o incluso restañar las dañadas.

Una línea de investigación en animales, por ejemplo, sugiere que el factor neurotrófico derivado de una línea de células gliales (FNDG), una familia de proteínas, incrementa la tasa de supervivencia de neuronas dopaminérgicas dañadas y reduce de forma drástica los síntomas parkinsonianos. Steve Gill y su grupo, del Hospital Frenchay de Bristol, se han embarcado en un estudio piloto para suministrar FNGD a enfermos de Parkinson. Los cirujanos insertan un catéter en los cuerpos estriados derecho e izquierdo de los ganglios basales, principales receptores de la dopamina secretada por las neuronas de la sustancia negra. Luego, mediante una bomba peristáltica colocada en el abdomen, se perfunden en el cerebro sin solución de continuidad pequeños volúmenes de FNGD. La bomba contiene suficiente cantidad de FNGD para durar un mes; se recarga en la propia consulta: con una jeringa se atraviesa la piel y vuelve a llenarse el depósito de la bomba.

Los resultados iniciales obtenidos a partir de un pequeño grupo de pacientes mostraron un alivio de los síntomas; los escáneres de tomografía por emisión de positrones (TEP) señalaron una recuperación de la absorción de dopamina en los cuerpos estriados y en la sustancia negra. Sin embargo, los resultados de un estudio más reciente y con mayor número de pacientes no han aclarado nada: no se observaron diferencias entre los pacientes a los que se les suministró una disolución salina y los pacientes tratados con FNGD.

Aun así, muchos de los que trabajamos en esta área pensamos que merece la pena seguir insistiendo por ese camino. No sería la primera vez que los ensayos iniciales de un tratamiento ofrecen resultados negativos. La levodopa, por ejemplo, no mostró al principio ninguna mejora, tan sólo efectos secundarios; hoy constituye la base de uno de los principales tratamientos para la enfermedad de Parkinson.

Otros grupos de investigación han optado por administrar FNGD mediante terapia génica, en vez de recurrir a la cirugía. Confían en que el gen introducido ofrezca un suministro a largo plazo del factor neurotrófico. Jeffrey H. Kordower, del Hospital Presbiteriano Rush de San Lucas en Chicago, y Patrick Aebischer, del Instituto de Neurociencias del Instituto Federal Suizo de Tecnología, con sus equipos colaboradores, diseñaron un lentivirus portador del gen que codifica FNGD y lo introdujeron en las células productoras de dopamina de los cuerpos estriados de cuatro monos con la enfermedad de Parkinson. Obtuvieron resultados impresionantes: los problemas motores disminuyeron de forma notable y la posterior inyección de MPTP, una sustancia tóxica para las neuronas dopaminérgicas de la sustancia negra, no produjo ningún efecto secundario. El gen introducido indujo en las células la síntesis de la proteína durante los seis meses de duración del experimento.

Sobre la base de esos trabajos, los laboratorios de la compañía Ceregene, con sede en San Diego, ensayan una técnica similar para suministrar neurturina, una proteína de la familia FNGD. Aunque todavía en una fase preclínica, la empresa se propone realizar ensayos en humanos con un gen similar al de la neurturina.

No termina ahí el elenco de vías terapéuticas en estudio. En Avigen, cerca de San Francisco, Krys Bankiewicz ha demostrado en modelos animales que la introducción en los cuerpos estriados del gen de la enzima "descarboxilasa de aminoácidos aromáticos" incrementa la síntesis de dopamina en dicha estructura cerebral. Este tratamiento ha conseguido aliviar los síntomas de la enfermedad de Parkinson también en ratas y monos. Aprobados ya, los ensayos con humanos no tardarán en abordarse.

El grupo que dirige Michael Kaplitt, de la Universidad de Cornell, ha tomado un enfoque distinto: se sirve de la terapia génica para inactivar regiones del cerebro que se tornan hiperactivas (núcleo subtalámico y ganglios basales incluidos) cuando escasea la dopamina liberada por la sustancia negra. La falta de dopamina provoca que las neuronas productoras de glutamato, un neurotransmisor de acción excitante, operen sin oposición y, por tanto, sobreestimulen a sus vecinas alterando la motricidad del individuo.

Kaplitt comenzará a ensayar en humanos la introducción (mediante un virus) en esas regiones del cerebro del gen que codifica la "ácido glutámico descarboxilasa" —enzima crucial para la producción de ácido gammaaminobutírico (GABA, de "gamma amino butyric acid")—, un neurotransmisor de acción inhibitoria. Espera que GABA reprima las células hiperexcitadas y así atenúe

los trastornos motores asociados a la enfermedad de Parkinson.

En los experimentos en cuestión, se introduce un tubo del diámetro de un cabello a través de un orificio del tamaño de una moneda de euro practicado en la parte superior del cráneo. El tubo suministra una dosis del virus, que transporta copias del gen hasta el interior de las neuronas del núcleo subtalámico. Las sustancias liberadas por las células transformadas no sólo deberían aplacar las neuronas hiperactivas que residen en esa región, sino que podrían también remitirse hacia otras áreas cerebrales hiperactivas.

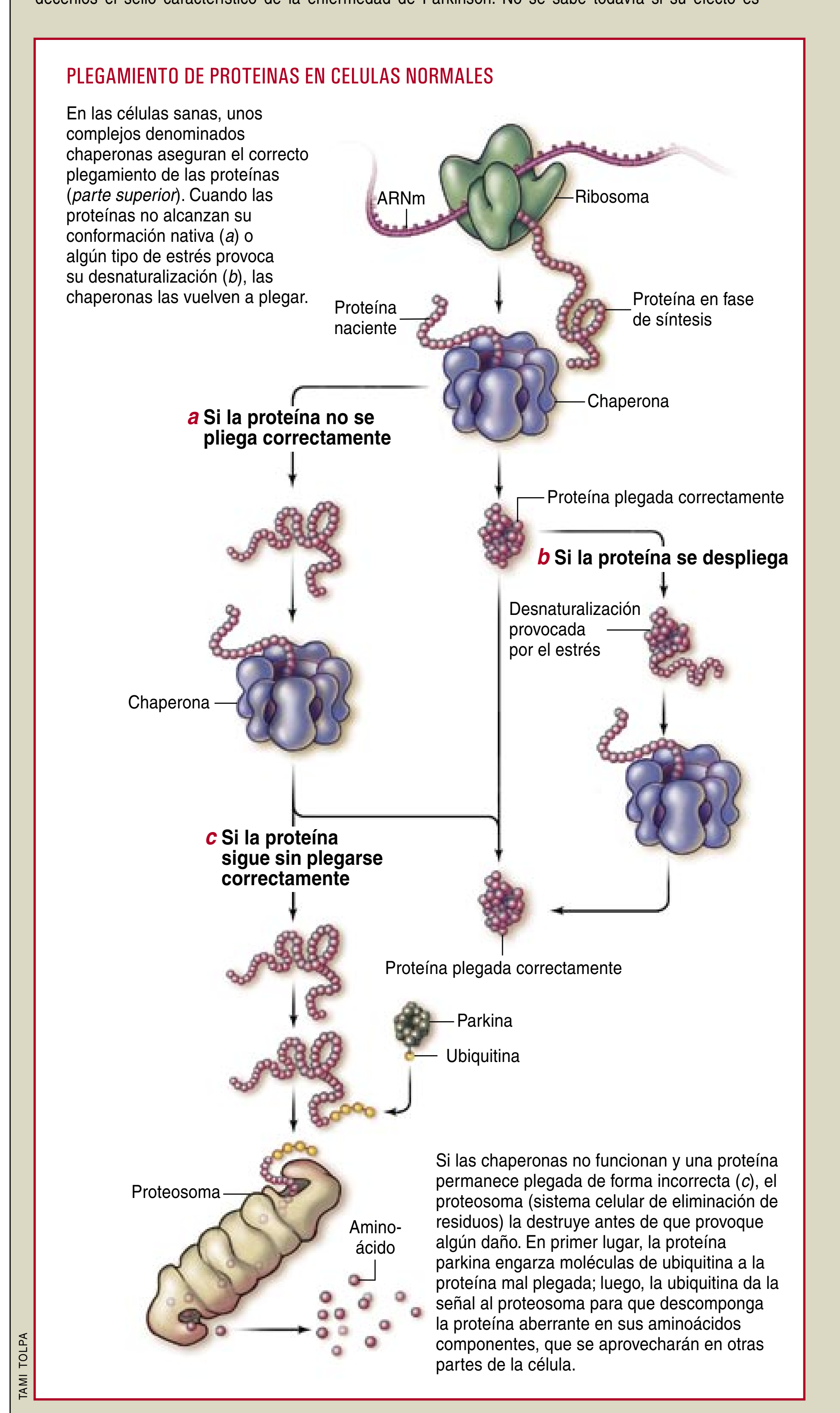
La terapia que genera mayor controversia quizá sea la que contempla el trasplante de células para reemplazar a las neuronas muertas. Se basa en implantar células madre embrionarias, o adultas, y conseguir que estas células indiferenciadas se conviertan en neuronas productoras de dopamina. Puesto que las células madre embrionarias se obtienen a partir de embriones de pocos días originados en procesos de fecundación *in vitro*, su utilización resulta polémica desde un punto de vista moral. Menos objeciones éticas plantea el uso de células madre adultas, que se obtienen a partir de tejido adulto, si bien algunos expertos creen que resulta más enojoso trabajar con ellas.

A pesar de los importantes avances en la identificación de las señales moleculares y los métodos que inducen la producción de dopamina en células indiferenciadas, no se sabe todavía si el trasplante (de cualquier tipo) alcanzará la eficacia deseada. Hasta la fecha, los ensayos clínicos se han realizado siguiendo los protocolos más prometedores, que utilizaban material fetal. Se ha demostrado la supervivencia de cientos de miles de células productoras de dopamina trasplantadas en los pacientes aunque, por ahora, los beneficios funcionales han sido, en el mejor de los casos, modestos e inconsistentes; además, se han observado disquinesias (contorsiones incontroladas) y otros efectos adversos graves. Los expertos se proponen averiguar las causas del fracaso de los trasplantes y de la aparición de los efectos secundarios.

Por último, se continúan investigando y refinando los tratamientos

PROTEINAS Y LA ENFERMEDAD DE PARKINSON

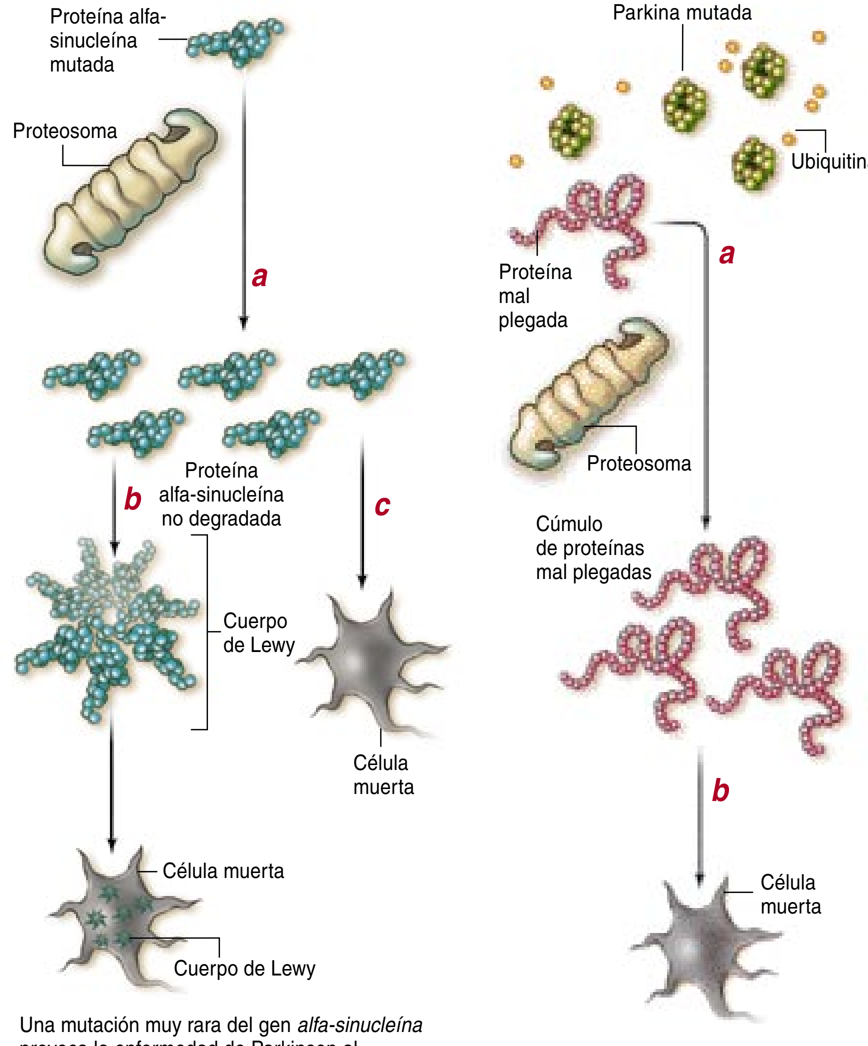
Los cuerpos de Lewy, unas acumulaciones de proteínas mal plegadas, se han considerado durante decenios el sello característico de la enfermedad de Parkinson. No se sabe todavía si su efecto es



protector (porque "barren" las proteínas tóxicas) o si, en última instancia, son los desencadenantes de la muerte neuronal. Lo que sí está claro es que las proteínas aberrantes subyacen bajo la enfermedad.

¿QUE MECANISMO SE ALTERA EN LA ENFERMEDAD DE PARKINSON?

Por razones no del todo conocidas, las chaperonas y el proteosoma no funcionan bien en enfermos de Parkinson. Las proteínas aberrantes (las que no han alcanzado su conformación nativa o han sufrido desnaturalización) se acumulan en las células porque las chaperonas no dan más de sí o porque el proteosoma no logra destruirlas con suficiente prontitud; esta acumulación lesiona y provoca la muerte de las neuronas afectadas. La investigación genética sugiere que las formas mutantes de dos proteínas, la alfa-sinucleína (*izquierda*) y la parkina (*derecha*), contribuyen a mermar el rendimiento de las chaperonas y del sistema de eliminación de proteínas.



Una mutación muy rara del gen *alfa-sinucleína* provoca la enfermedad de Parkinson al originar una forma de la proteína resistente a la degradación por parte del proteosoma (*a, arriba*). Se piensa que los cuerpos de Lewy podrían desarrollar una función protectora, puesto que, al principio, las acumulaciones de alfa-sinucleína mutadas que acaban formando parte de un cuerpo de Lewy (*b*) parecen resultar menos dañinas que las copias de la proteína que circulan libremente por la neurona causando su rápida destrucción (*c*).

Las versiones mutadas de la parkina son incapaces de añadir ubiquitina a las proteínas mal plegadas. En consecuencia, el proteosoma no destruye las proteínas aberrantes (*a, arriba*), que, en última instancia, provocan la muerte celular (*b*). La parkina mutada no origina cuerpos de Lewy.

basados en la estimulación profunda del cerebro mediante pulsos eléctricos. Hace algunos meses, el equipo que dirige Stéphane Palfi, del Servicio Hospitalario CEA Frédéric Joliot en Orsay, reseñó que en papiones afectados por una variante de la enfermedad de Parkinson, una suave estimulación de la superficie cerebral aliviaría los síntomas. En Francia y en otros lugares se están llevando a cabo ensayos clínicos para determinar la eficacia de esta intervención quirúrgica en humanos.

Aunque todavía queda mucho por conocer sobre la enfermedad de Parkinson, los últimos hallazgos genéticos y celulares resultan sumamente estimulantes. Abren esperanzas para nuevos tratamientos que, combinados con los que ya existen, frenen el progreso de la enfermedad y mejoren el control sobre este inquietante trastorno del sistema nervioso.

Los autores

Andrés M. Lozano y Suneil K. Kalia vienen colaborando en la investigación sobre la enfermedad de Parkinson desde hace varios años. Lozano, nacido en España, cursó sus estudios de medicina en la Universidad de Ottawa; ocupa la cátedra R. R. Tasker de neurocirugía funcional y estereotáctica en el Hospital Occidental de Toronto y la Universidad de Toronto. Ha dedicado su carrera a ahondar en las causas de la enfermedad de Parkinson y al desarrollo de tratamientos quirúrgicos. Kalia ha terminado recientemente su tesis doctoral bajo la dirección de Lozano. Ha centrado su investigación en la función de las chaperonas en la enfermedad de Parkinson.

Bibliografía complementaria

PARKINSON'S DISEASE, partes 1 y 2. A. E. Lang y A. M. Lozano en *New England Journal of Medicine*, vol. 339, págs. 1044-1053 y págs. 1130-1143. 8 y 15 de octubre de 1998.

GENETIC CLUES TO THE PATHOGENESIS OF PARKINSON'S DISEASE. Miguel Vila y Serge Przedborski en *Nature Medicine*, vol. 10, págs. S58-S62; julio de 2004.

NEURODEGENERATIVE DISEASES: A DECADE OF DISCOVERIES PAVES THE WAY FOR THERAPEUTIC BREAKTHROUGHS. Mark S. Forman, John Q. Trojanowski y Virginia M-Y Lee en *Nature Medicine*, vol. 10, págs. 1055-1063; octubre de 2004.



Simulación teórica de sociedades antiguas

La modelización por ordenador contribuye a desentrañar la arqueología del sudoeste norteamericano

Timothy A. Kohler, George J. Gumerman y Robert G. Reynolds

1. MANO PINTADA, ruina de 760 años de antigüedad en la región de Mesa Verde, en el sudoeste de Colorado. Esta zona ha sido estudiada mediante modelos teóricos que simulan las pautas de asentamiento y labranza de los antiguos anasazi.

BILL PROUD (*fotografía*); MANIPULACION DIGITAL DE SLIM FILMS

Sólo una pequeña fracción de la historia humana se halla reflejada en los textos. Para el resto, la principal fuente de información es la arqueología. Mediante el estudio de ruinas, útiles y objetos, los arqueólogos han elaborado con esfuerzo y esmero una serie de imágenes que describen las sociedades humanas cual existían hace miles o incluso millones de años. Mayor dificultad reviste determinar los procesos que provocaron el surgimiento o la evolución de estas sociedades. Los expertos siguen esforzándose en comprender la larga cadena de relaciones causa-efecto y eventos fortuitos que se extienden desde nuestros antepasados homínidos de hace cuatro millones de años —pequeñas bandas de primates que deambulaban erectos, carecían de útiles líticos y sin apenas comunicación verbal— hasta las comunidades y culturas modernas.

Con el advenimiento de la informática, los arqueólogos comenzaron a aplicar simulaciones teóricas para explorar la prehistoria humana. El método era sencillo: se programan algoritmos que remeden procesos tales como el crecimiento de la población y el consumo de recursos; las predicciones teóricas obtenidas se comparan luego con los registros arqueológicos reales.

Cuenta tal proceder con un ejemplo temprano: la celebrada tentativa, en los postreros años setenta del siglo pasado, de examinar el hundimiento de la civilización maya clásica, dominadora de una vasta extensión de México y de América Central entre los años 300 y 900 d.C. Este proyecto, dirigido por investigadores de Instituto de Tecnología de Massachusetts, examinó las relaciones entre la población general y el ritmo de construcción de monumentos mayas, así como entre otras variables. Sin embargo, dado que el modelo teórico consideraba las variables de forma agregada, la simulación no proporcionaba información sobre relaciones de carácter espacial; verbigracia: en qué regiones del territorio maya era máxima la producción agrícola.

Lenguajes informáticos de nuevo cuño han alentado, desde hace pocos años, el desarrollo de simulaciones más minuciosas. Lenguajes de

programación "orientados a objetos" (Java, por ejemplo) facilitan la incorporación en el modelo de un gran número de agentes individuales; cada uno corresponde a un hogar (o familia) distribuido por el territorio en estudio. Las interacciones entre los agentes simulan la formación de alianzas o el intercambio de recursos o de información. Los nuevos algoritmos no sólo permiten integrar reglas específicas que determinan las acciones de los agentes, sino lograr, además, que éstos aprendan a adquirir nuevas conductas.

Las simulaciones de los autores se han centrado en la prehistoria del sudoeste norteamericano. En particular, en la región de Four Corners, donde concurren los estados de Arizona, Nuevo México, Colorado y Utah. En esta zona, que albergó los antiguos indios pueblo (o anasazi), se halla uno de los registros arqueológicos mejor conocidos del mundo, sobre todo del milenio anterior a la llegada de los españoles, en el siglo XVI. La cultura anasazi de esta región culminó entre los años 1000 y 1300 de nuestra era, época en que se construyeron complejas ciudades y habitáculos en los acantilados. Pero al final de este período, los anasazi abandonaron repentinamente esos asentamientos y emigraron hacia el sur, hacia el centro y este de Arizona, el oeste de Nuevo México y el valle septentrional de río Grande.

La comparación de la madera que cortaron los anasazi con los registros de anillos anuales de los troncos de la región revela con notable exactitud las fechas de ocupación de los asentamientos. Los anillos de crecimiento de los árboles sirven también a los paleoclimatólogos para determinar, junto con análisis palinológicos y el estudio de la geología local, las temperaturas y las precipitaciones de la época.

Contamos en la actualidad con dos proyectos de modelización basados en agentes que se valen de esta información para reconstruir las pautas de asentamiento y labranza en el valle de Casa Grande, en Arizona, y en la región central de Mesa Verde, en Colorado. Esta investigación promete ampliar nuestros conocimientos sobre los antiguos anasazi; quién sabe si arrojará alguna luz sobre las calamidades en que debió quedar sumida su sociedad hace unos 700 años.

Prehistoria virtual

El valle de Casa Grande, en el nordeste de Arizona, ocupa una extensión de 180 kilómetros cuadrados. Los pueblo habitaron allí desde el 1800 a.C. hasta el 1300 d.C., aproximadamente. Este valle ha sido objeto de intensa investigación arqueológica durante una centuria. En los últimos cinco lustros, equipos multidisciplinares dirigidos por Jeffrey Dean, del laboratorio de investigación dendrocronológica de la Universidad de Arizona, han reconstruido con gran detalle el ambiente de su pasado. Fundados en las pautas de precipitación, las fluctuaciones del nivel freático y los ciclos de erosión y decantación, Dean y uno de los autores (Gumerman) estimaron el potencial de producción de maíz de cada hectárea de terreno del valle desde el año 400 hasta 1450.

Nuestra simulación para el valle de Casa Grande partía de un programa informático basado en agentes, desarrollado por Joshua Epstein y Robert Axtell, de la Institución Brookings del Instituto Santa Fe. Empezamos por introducir los datos ambientales en un mapa digitizado del valle; luego situamos al azar en ese mapa a los agentes, hogares virtuales en ese caso. Las características de los hogares modelizados (sus requerimientos nutricionales, por ejemplo) se infirieron de datos arqueológicos, así como de estudios etnográficos de grupos pueblo modernos y de otros grupos con agricultura de subsistencia. En el modelo original, supusimos que en cada hogar vivían cinco individuos, que cada individuo consumía 160 kilos de maíz al año, que sólo podía consumirse el 64 por ciento de la hipotética cosecha de maíz (para tener en cuenta las pérdidas debidas a la acción de roedores, insectos y demás) y que la capacidad de almacenamiento de un hogar era, a lo sumo, de 1600 kilogramos de grano.

Para crear el modelo de las pautas de asentamiento, se ejecutaron reglas sencillas. Según éstas, una familia trasladaría su hogar a otro enclave del valle si el rendimiento esperado de su parcela, combinado con la cantidad almacenada en el granero, caía por debajo de lo necesario para el sostén de sus miembros. Asimismo, se formaría un nuevo hogar cada vez que una hija alcanzase los 15 años (edad a la que las mujeres presumiblemente se casaban y abandonaban el hogar familiar). El lugar de residencia de las familias debía situarse a menos de un kilómetro de su terreno de cultivo y lo más cerca posible del agua. El programa permitía ajustar la fecundidad, la esperanza de vida y otras variables.

Según los resultados de las simulaciones, se evidenciaba que la ubicación y el tamaño de los asentamientos, amén de las fluctuaciones de la densidad de población en el transcurso del tiempo, estaban determinadas en buena medida por las condiciones ambientales. La ubicación teórica de las residencias virtuales mostró un notable grado de coincidencia con los puntos donde se habían descubierto y fechado las viviendas del valle de Casa Grande.

El modelo original presentaba, empero, una importante discrepancia con la realidad: pronosticaba una población seis veces mayor que la estimada a partir de los datos arqueológicos. Con el reajuste del índice de producción de las granjas en consonancia con las variedades prehistóricas del maíz y la modificación de la longevidad y la fecundidad de los hogares, la población

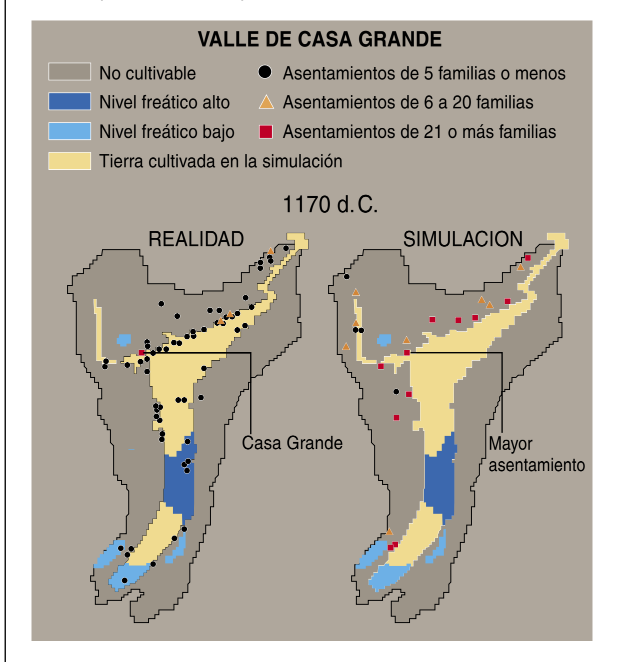
Resumen/Arqueología virtual

- Con la ayuda de nuevos programas informáticos basados en agentes, los arqueólogos han elaborado modelos teóricos que muestran cómo las condiciones ambientales habrían configurado la historia de los indios pueblo del sudoeste norteamericano.
- La grave sequía ocurrida a finales del siglo XIII no basta para explicar que los pueblo emigraran masivamente de Mesa Verde y sus aledaños.
- Se examinan ahora otros factores que pudieran haber influido en los pueblo: los efectos de la caza, la recolección de leña y procesos culturales como el trueque y la donación de regalos.

CRECIMIENTO Y DECLIVE PREHISTORICOS

Los modelos teóricos se han centrado sobre todo en el valle de Casa Grande, en el nordeste de Arizona, que estuvo habitado por los indios pueblo desde 1800 a.C. hasta 1300 d.C.

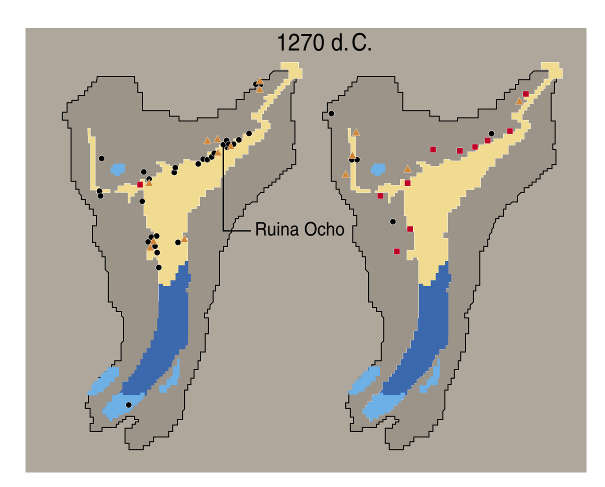
Las simulaciones por ordenador se han empleado para desentrañar los motivos que llevaron a los pueblo a abandonar el valle, hace unos 700 años.

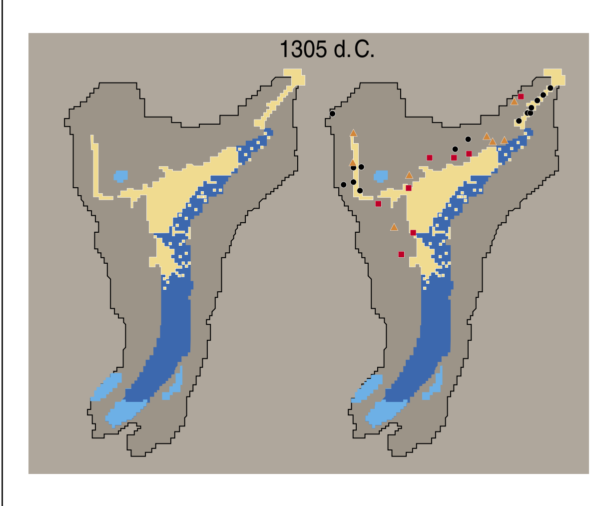


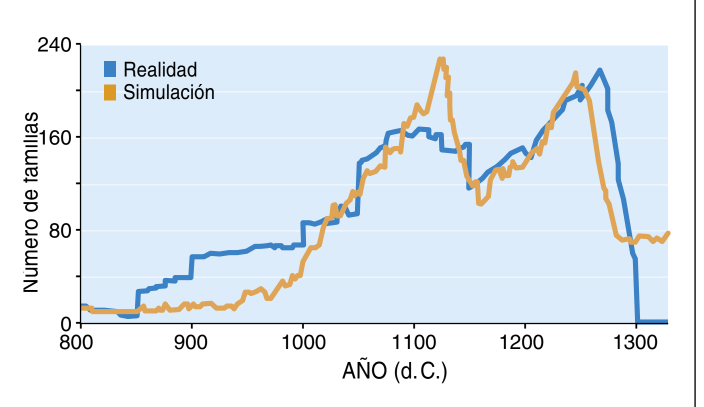


El modelo se construyó a partir de datos ambientales —precipitaciones y fluctuaciones del nivel de la capa freática entre otros—, que se introdujeron en una digitización del mapa del valle. El programa sitúa en el mapa, al azar, hogares virtuales; luego rastrea los desplazamientos que cada familia traza en busca del terreno más apropiado para el cultivo de maíz. La simulación muestra que hacia 1170 d.C. la población se apiñaba a lo largo del límite noroccidental del valle, lo que coincide con la distribución real descubierta por los arqueólogos (*izquierda, arriba*). Aunque los asentamientos virtuales aparecen más apiñados que los reales, el mayor de los virtuales se encuentra a menos de 100 metros de la Casa Grande, la ruina más importante del valle (*arriba*). Hacia 1270, la erosión de las tierras cultivables obliga a las familias virtuales a abandonar la porción meridional del valle, lo que nuevamente concuerda con el registro arqueológico real (*izquierda, centro*). La Ruina Ocho, asentamiento situado en un acantilado, data de este período (*arriba*).

En los años posteriores, sin embargo, los escenarios (real y virtual) divergen. En la simulación teórica, una población muy mermada sobrevive a una prolongada sequía; en la realidad, el valle se hallaba totalmente despoblado en 1305 (*izquierda, abajo*). Una nueva versión del modelo, más refinada, redujo el número de hogares virtuales, ajustándose más a los datos arqueológicos; pero aun así, subsistieron las discrepancias posteriores a 1300 (*abajo*). A tenor de los resultados, los factores que indujeron a los pueblo supervivientes a abandonar el valle quizá fueron sociopolíticos o ideológicos.



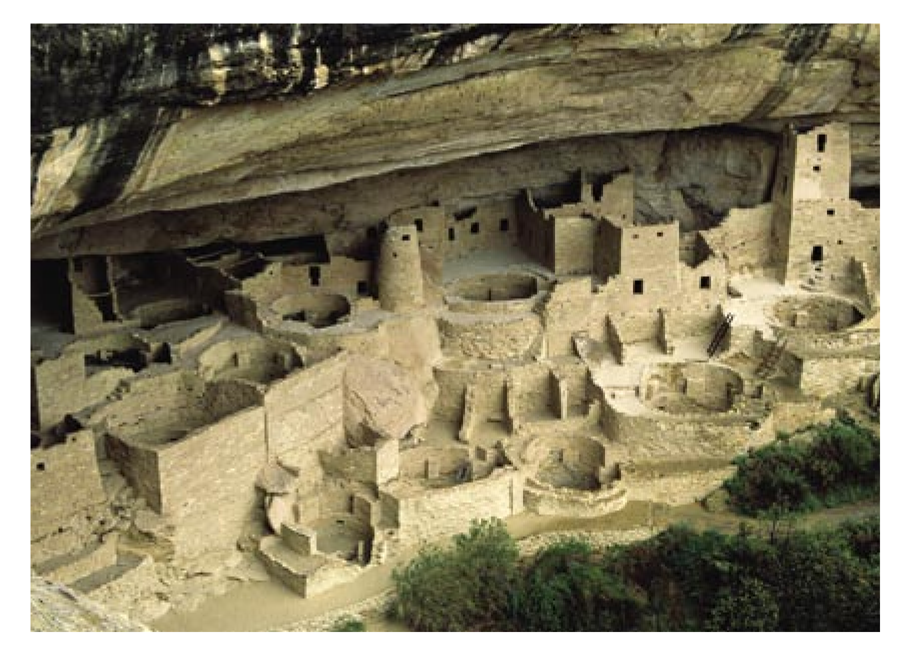




LUCY READING-IKKANDA; FUENTE: JEFFREY S. DEAN *Universidad de Arizona*, GEORGE J. GUMERMAN *Escuela Americana de Investigación* Y JOSHUA M. EPSTEIN Y ROBERT L. AXTELL *Brookings Institution (mapas y gráficos)*; MUENCH PHOTOGRAPHY, INC. *(fotografía)*

simulada mostró mayor ajuste con los valores reales.

Los estudios resaltaron, asimismo, los terribles efectos del deterioro ambiental que sufrió la región en las postrimerías del siglo XIII, cuando a una sequía prolongada se sumó el descenso de los niveles freáticos. El número de hogares virtuales cayó desde más de 200 en 1250 a unos 80 medio siglo después. Según los datos arqueológicos, sin embargo, el valle de Casa Grande estaba completamente deshabitado en el siglo XIV. Aunque las condiciones ambientales eran favorables para el mantenimiento de una población reducida, todos los anasazi del valle habían muerto o emigrado. De ello se infiere que ciertos factores sociopolíticos, ideológicos o ambientales *no* considerados en nuestro modelo debieron contribuir a la total desolación de la zona. Quizá la escasez de alimentos tornó a los pueblo más vulnerables a las epidemias. O puede que la población devastada abandonara sus instituciones culturales o religiosas, y ello desembocara en la decisión colectiva de emigrar.



2. EN LOS ACANTILADOS de Mesa Verde los asentamientos crecieron rápidamente a mediados del siglo XIII, al trasladarse los anasazi a enclaves más defendibles. En 1300, sin embargo, fueron abandonados.

Q. T. LUONG *Terra Galleria Photography*

De casas-pozo a mansiones

Una serie de modelizaciones análogas se han emprendido en el Instituto Santa Fe para estudiar la prehistoria del sudoeste de Colorado. Esta región, que en su mayor parte estaba en un principio cubierta por praderas de artemisa o ralos bosquecillos de pinos piñoneros y enebros, fue colonizada por agricultores hacia el año 600, durante el período arqueológico denominado Cestería III. Las familias vivían en casas-pozo, moradas semisubterráneas en las que los zócalos de las paredes eran los térreos costados de un estrecho pozo. Las casas-pozo estaban agrupadas en aldehuelas, que a su vez se organizaban en pequeños vecindarios o comunidades.

La caza desempeñaba en su dieta una función casi tan importante como la agricultura. Los primeros colonizadores gozaron de notable prosperidad; ayudados por la inmigración, su población creció de forma notable. En las postrimerías del siglo VIII surgieron villas de cientos de personas: un cambio drástico en la forma de asentamiento; algunas de ellas alcanzaron una población aún mayor a finales del IX. ¿Por qué se formaron estos pueblos en este lugar y momento? ¿Se debió a las ventajas económicas de dichos emplazamientos o tal vez a la búsqueda de protección?

Los poblados fueron abandonados hacia el año 900, cuando los anasazi emigraron en masa de esa región. Las razones de tal éxodo son objeto de debate. Dos de las causas esgrimidas pudieran ser la deforestación en los aledaños de las villas y una serie de veranos frescos y secos. (La variación climática típica de esa zona va de una estación calurosa y seca a otra húmeda y fresca; el frío y la sequedad plantean especiales dificultades a los agricultores que dependen más de la lluvia que del regadío.)

Las condiciones para el cultivo mejoraron durante los siglos X y XI, en este lugar así como en todo el sudoeste septentrional. Lentamente, las poblaciones locales se recuperaron. La crianza de pavos domesticados adquirió creciente importancia en este período. De nuevo, la mayor parte de la población residía en pequeñas aldeas agrupadas en comunidades laxas.

A finales del siglo XI, las aldeas con un papel central en estas comunidades dispersas crecieron en número y tamaño; muchas de ellas parecen haber sufrido la influencia de los complejos asentamientos anasazi del cañón del Chaco, al sur, en lo que hoy es el norte de Nuevo México. En algunas de las villas de Colorado se alzaban "mansiones" —edificios de varios pisos que constan de muchas habitaciones— que guardan mayor semejanza con las estructuras observadas en Chaco que con los estilos arquitectónicos locales. La presencia de fortificaciones a mediados del siglo XI pudiera representar una resistencia, en última instancia fútil, a la expansión de Chaco.

La construcción de ese tipo de mansiones se abandonó hacia 1135, al comienzo de una grave sequía que duró 45 años; se produjo una transición marcada por episodios de extrema violencia, que posiblemente llegaron al canibalismo. En la región central de Mesa Verde la población dejó de crecer, pero mantuvo la estructura basada en grandes centros comunales, rodeados por aldeas pequeñas.

A mediados del siglo XIII, la mayoría de los centros comunales se desplazaron a enclaves menos vulnerables, en las cabeceras de los cañones o en refugios como el de los acantilados del Parque Nacional de Mesa Verde. Lo mismo que en el resto del sudoeste septentrional, la ocupación de la región concluyó a finales del siglo XIII, cuando la pobla-

ción que aún subsistía huyó hacia el sur y hacia el este desde los grandes poblados de la cabecera de los cañones, en medio de una climatología adversa y brotes de violencia. El por qué de ese trágico despoblamiento constituye todavía uno de los clásicos enigmas de la arqueología.

Nuestras simulaciones cubren un área de 1800 kilómetros cuadrados situada al noroeste del Parque Nacional de Mesa Verde. Hemos dividido el territorio virtual en 45.000 cuadrículas, de 200 metros de lado cada una; hemos estimado la producción de maíz hipotética de cada parcela en función del tipo de suelo, la altitud y la pluviometría anual. (A Carla R. Van West, hoy en Statistical Research en Tucson, debemos los paisajes de producción anual de maíz hipotética; los elaboró para la tesis doctoral que realizó en la Universidad estatal de Washington.) En la primera fase de la investigación examinamos sólo el período entre los años 900 y 1300. Generamos, lo mismo que en la simulación del valle de Casa Grande, una distribución aleatoria de familias y las dotamos de reglas que especificaban su localización en (o cerca de) las zonas de máxima productividad agrícola no utilizadas todavía.

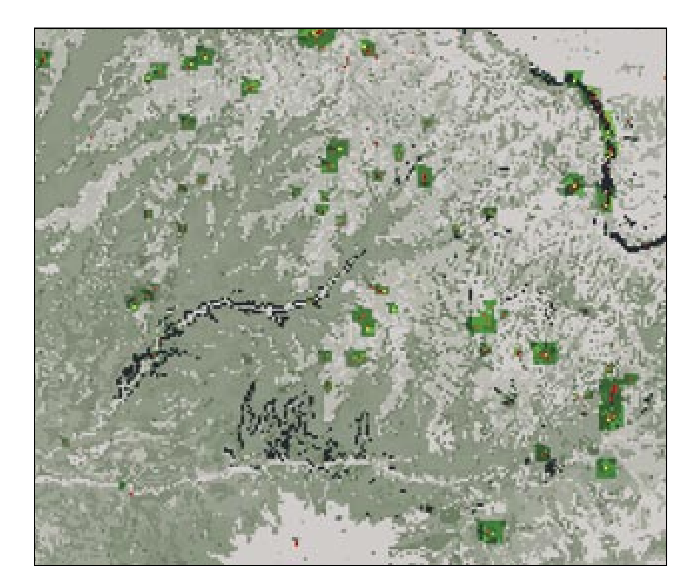
Las pautas de asentamiento generadas por la interacción de estos agentes mostraban un escaso grado de coincidencia con los patrones reales que se inferían de las investigaciones arqueológicas en la región. Introdujimos, pues, una nueva variable en el modelo: exigimos que, a la hora de escoger la localización de su morada, los agentes tuvieran en cuenta también la distribución del agua; una hipótesis ésta razonable, tratándose de un terreno semiárido.

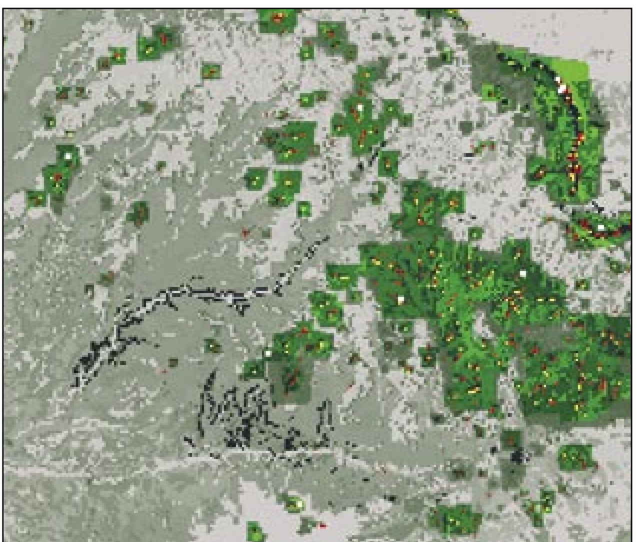
Los resultados mostraron un avance notable, pero seguimos refinando el modelo: ajustamos el programa para que tuviera en cuenta la lenta degradación del suelo por efecto del cultivo de subsistencia (ello obligaría a las familias a cambiar periódicamente de parcela). Los patrones de asentamiento así obtenidos coincidieron todavía más con los datos reales.

Con todo, nuestras simulaciones seguían sin mostrar un declive demográfico tan brusco como el acontecido en la región de Mesa Verde a finales del siglo XIII. ¿Qué otros factores debieron contribuir a la catástrofe? Una de las variables que *no* incluimos en el modelo fue la distribución de aguas superficiales, que probablemente resultó modificada con los cambios climáticos.

A finales del siglo XIII, las villas de los anazasi se apiñaban todas en torno a fuentes y manantiales; cualquier interrupción de su caudal pudo resultar desastrosa. Además, el despoblamiento de nuestra área de estudio (y del resto del sudoeste septentrional) ocurrió poco antes de la Pequeña Edad de Hielo, un período de clima frío, que duró desde 1300 hasta 1850, y cuyos efectos en el sudoeste norteamericano generan aun controversia. Dado que nuestra región corresponde a tierras altas y cercanas al límite septentrional para el cultivo del maíz en este momento de la prehistoria, hasta un ligero descenso de las temperaturas en la época de crecimiento o un aumento de la duración del período de crecimiento acarrearían graves consecuencias.

Los pueblo agotaron casi toda la leña de la región de Mesa Verde. Este y otros sucesos comienzan a salir a la luz merced a los trabajos de David Johnson y Jason Cowan, de la Universidad estatal de Washington. Partieron del supuesto de que las familias pueblo consumían 1,1 toneladas métricas de madera por persona y año, valores próximos a los observados en grupos sociales paquistaníes que habitan en latitudes y elevaciones similares. Las simulaciones mostraron que 700 años de consumo de combustible vegetal





TIMOTHY A. KOHLER, C. DAVID JOHNSON Y JASON A. COWAN *Universidad Estatal de Washington*

3. EXPLOTACION FORESTAL de la región de Mesa Verde. La ilustración corresponde a una simulación teórica basada en el uso que los antiguos indios pueblo hacían de la leña. El modelo supone que en los asentamientos —representados en los mapas mediante puntos (en *rojo* los de una o dos familias, en *amarillo* los de tres a nueve familias y en *blanco* los de diez familias o más)— se consumían 1,1 toneladas métricas de madera por persona y año. En 650 d.C. (*izquierda*), cuando la población es escasa, la mayor parte de la región cuenta con leña abundante (*zonas grises*). Pero tras 250 años de crecimiento demográfico y de recolección continua, los aledaños de los asentamientos quedan esquilmados, dejando sólo la vegetación viva (*verde*).

habrían dejado peladas extensiones importantes de terreno situadas en torno a los asentamientos.

Ahora estamos programando modelos parecidos para simular los efectos a largo plazo de la caza de las principales especies de la región (ciervos, conejos y liebres). Nuestros estudios iniciales sugieren que la actividad cazadora habría aniquilado casi todos los ciervos de la zona, lo que explicaría por qué el pavo domesticado ganó tanta importancia en la dieta de los pueblo desde el año 900.

Las simulaciones por ordenador ofrecen una gran ventaja: permiten efectuar experimentos, hazaña imposible en arqueología, salvo por este método. Para refinar el modelo, los detalles se incorporan poco a poco. De ese modo, se ensaya si determinado factor ambiental o social aproxima la prehistoria virtual al registro arqueológico. Con el fin de extender nuestra investigación hasta el siglo VII, nos servimos de simulaciones para estudiar el crecimiento y declive bruscos de las primeras aldeas anasazi. En fecha reciente, el Centro Arqueológico Crow Canyon, de Cortez, en Colorado, ha completado nuevos trabajos de campo integrados en una ambicioso programa concebido para datar de nuevo los más de 3300 emplazamientos residenciales descubiertos en nuestra área de estudio. Este trabajo ha arrojado luz sobre la distribución de los hogares pueblo en el transcurso del tiempo, proporcionando mapas más precisos con los que contrastar la simulación de la dinámica de habitación.

Por su parte, Kenneth Holm, de la Universidad estatal de Washington, y Schaun Smith, de la Escuela de Minas de Colorado, están desarrollando un modelo que estima en qué medida se vieron afectadas las fuentes y los cursos de agua por las oscilaciones de temperatura y precipitaciones.

Cuando acoplemos este modelo a nuestra simulación de asentamientos podremos observar si las variaciones en la distribución de los recursos hídricos habrían influido en las decisiones de los pueblo sobre dónde vivir y cultivar. Estamos incorporando también los efectos de la temperatura sobre la productividad agrícola. Por último —y quizá lo más fascinante—, tratamos de simular algunos de los factores sociales y culturales que conformaron a las sociedades anasazi.

Modelización de la cultura

Uno de los pioneros de la modelización arqueológica, Jim Doran, de la Universidad de Essex, enunció en cierta ocasión que "los modelos de gran alcance se construyen, si llegan a serlo, con muchas manos y en el transcurso de muchos decenios". Los modelos antecitados no constituyen ninguna excepción. Los algoritmos culturales —bastidor de la simulación de cambios culturales y sociales— nacieron del empeño de Kent Flannery, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, quien se afanó por elaborar un modelo de la aparición de la agricultura en la prehistoria de América Central. Flannery sugería que la transición desde la caza y la recolección hacia un incipiente laboreo de las tierras

EXODO ENIGMATICO

A finales del siglo XIII, los pueblos agrícolas del sudoeste norteamericano se extendieron hacia el norte, penetrando en lo que ahora son Utah y Colorado. Abarcaron mesas y valles fluviales (*izquierda*). A principios del siglo XV, sin embargo, los pueblo se habían retirado de las áreas septentrionales, para establecerse en valles de regadío (*derecha*). Las simulaciones por ordenador ayudan a esclarecer los factores que desencadenaron este éxodo; quizá no fueron únicamente ambientales.





LUCY READING-IKKANDA

en el valle mexicano de Oaxaca comenzó cuando sus pobladores aprendieron a programar el cultivo y la cosecha.

Uno de los autores (Reynolds) ejecutó el modelo de Flannery valiéndose de datos sobre antiguos restos de plantas hallados en Guilá Naquitz, una cueva de Oaxaca. En estas simulaciones, los agentes trazaban planes para procurarse recursos; los planes que demostraban mayor productividad se transmitían (de forma selectiva) a un "espacio de creencias" donde, a partir de la generalización de las experiencias individuales, se generaban reglas que a su vez guiaban el comportamiento de otros agentes en ese mundo virtual. Con el tiempo, la simulación produjo un reajuste acumulativo de actividades que se parecían sobremanera a los patrones observados en el registro arqueológico durante la transición a la agricultura.

Reynolds y Ziad Kobti, de la Universidad canadiense de Windsor, utilizaron algoritmos culturales en la simulación de Mesa Verde para ver qué ocurre cuando los hogares de una red de individuos emparentados truecan maíz. Este proyecto modeliza lo que Marshall Sahlins, de la Universidad de Chicago, ha denominado reciprocidad generalizada: el intercambio, entre parientes cercanos, de regalos que no exigen compensación. (Por ejemplo, no esperamos que nuestros hijos nos devuelvan lo que gastamos en sus correctores dentales, su ropa o sus estudios universitarios.) En las simulaciones, las familias utilizan algoritmos culturales para decidir cuál es el pariente más adecuado para interactuar con él, determinando a partir de experiencias anteriores los tipos de trueques con mayor probabilidad de redundar en provecho mutuo. Luego, el conocimiento generado sobre tipos óptimos de intercambios se propaga al espacio de creencias, donde queda a disposición de otras familias.

La incorporación de estas redes de parentesco a las simulaciones tiende a incrementar la población total. Como sería de esperar, la posibilidad de intercambiar maíz aumentaba la capacidad para capear los reveses de la producción agrícola. En ciertos experimentos impedimos que las familias se alejaran mucho de su localización inicial cuando buscaran un lugar donde vivir mejor; esta restricción simulaba los peligros a los que han de enfrentarse las familias aisladas, en un medio social hostil. En tal escenario, el volumen de trueques aumenta bruscamente en el seno de cada comunidad, pero los vínculos de intercambio entre comunidades distintas desaparecen, aumentando la vulnerabilidad del conjunto de la población ante los cambios climáticos. El apiñamiento de hogares dificulta también la recogida de leña y la caza, porque la tierra que rodea a las comunidades queda concienzudamente esquilmada.

Nuestros modelos son todavía demasiado simples. Las simulaciones no logran reproducir las agregaciones periódicas de población que se produjeron en la región de Mesa Verde o el éxodo acontecido entre 1260 y 1280. Seguimos sin conocer la combinación de causas que condujeron a tal dinámica poblacional. No obstante, los modelos sí muestran con toda claridad que las gentes que habitaban en esta región (y es de presumir que también en los demás hábitats del sudoeste septentrional) tuvieron que afrontar dificultades en muchos frentes durante el siglo XIII. Las contrariedades debieron multiplicarse con el tiempo: por ejemplo, el aumento de la deforestación probablemente redujo las existencias de caza y de algunos alimentos silvestres de importancia, como los piñones; a su vez, estos descensos provocaron un aumento de la dependencia del maíz, de su trueque, así como del pavo doméstico, que podía criarse con maíz. Si el intercambio de maíz, quizás en el contexto de festejos, constituía también uno de los principales lubricantes de las relaciones sociales, entonces la subsistencia y la sociedad quedaban precariamente sustentadas en los azares del cultivo.

A pesar de que los mundos artificiales que creamos en estas simulaciones teóricas constituyen versiones simplificadas de la realidad, proporcionan pautas de una complejidad fabulosa. Hemos hallado que los hogares virtuales alteran a menudo su entorno y limitan con ello las opciones de su progenie e incluso ponen en peligro su supervivencia a largo plazo. Además de arrojar luz sobre el pasado remoto, las simulaciones pueden sugerir métodos de sostenimiento de nuestros recursos naturales en el futuro. Por ejemplo, los modelos que revelan los efectos de la deforestación en la región de Mesa Verde pueden ayudar a trazar planes para la conservación de los bosques en los países en vías de desarrollo. Merced a las simulaciones por ordenador, las lecciones que hemos recabado de las sociedades antiguas podrían hallar pronto aplicación en el mundo moderno.

Los autores

Timothy A. Kohler, George J. Gumerman y Robert G. Reynolds se dedican a la simulación teórica de sociedades antiguas. Kohler es profesor en el departamento de antropología de la Universidad estatal de Washington e investigador del Centro Arqueológico Crow Canyon de Cortez, en Colorado. Gumerman es presidente interino del Instituto de Investigación Americana en Santa Fe. Reynolds imparte clases de informática en la Universidad estatal de Wayne y es investigador en el Museo de Antropología de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. Los autores desean expresar su agradecimiento al apoyo de la National Science Foundation.

Bibliografía complementaria

GUILÁ NAQUITZ: ARCHAIC FORAGING AND EARLY AGRICULTURE IN OAXACA, MEXICO. Dirigido por Kent V. Flannery. Academic Press, 1986.

GROWING ARTIFICIAL SOCIETIES: SOCIAL SCIENCE FROM THE BOTTOM UP. Joshua M. Epstein y Robert L. Axtell. Brookings Institution Press y MIT Press, 1996.

DYNAMICS IN HUMAN AND PRIMATE SOCIETIES: AGENT-BASED MODELING OF SOCIAL AND SPATIAL PROCESSES. Dirigido por Timothy A. Kohler y George J. Gumerman. Oxford University Press, 2000.

SEEKING THE CENTER PLACE: ARCHAEOLOGY AND ANCIENT COMMUNITIES IN THE MESA VERDE REGION. Dirigido por Mark D. Varien y Richard H. Wilshusen. University of Utah Press, 2000.

La física y los diagramas de Feynman

En manos de la primera generación de físicos de la posguerra, un artificio de cálculo ideado para sacar a la electrodinámica cuántica del callejón sin salida en que se hallaba, acabaría transformando la física

David Kaiser

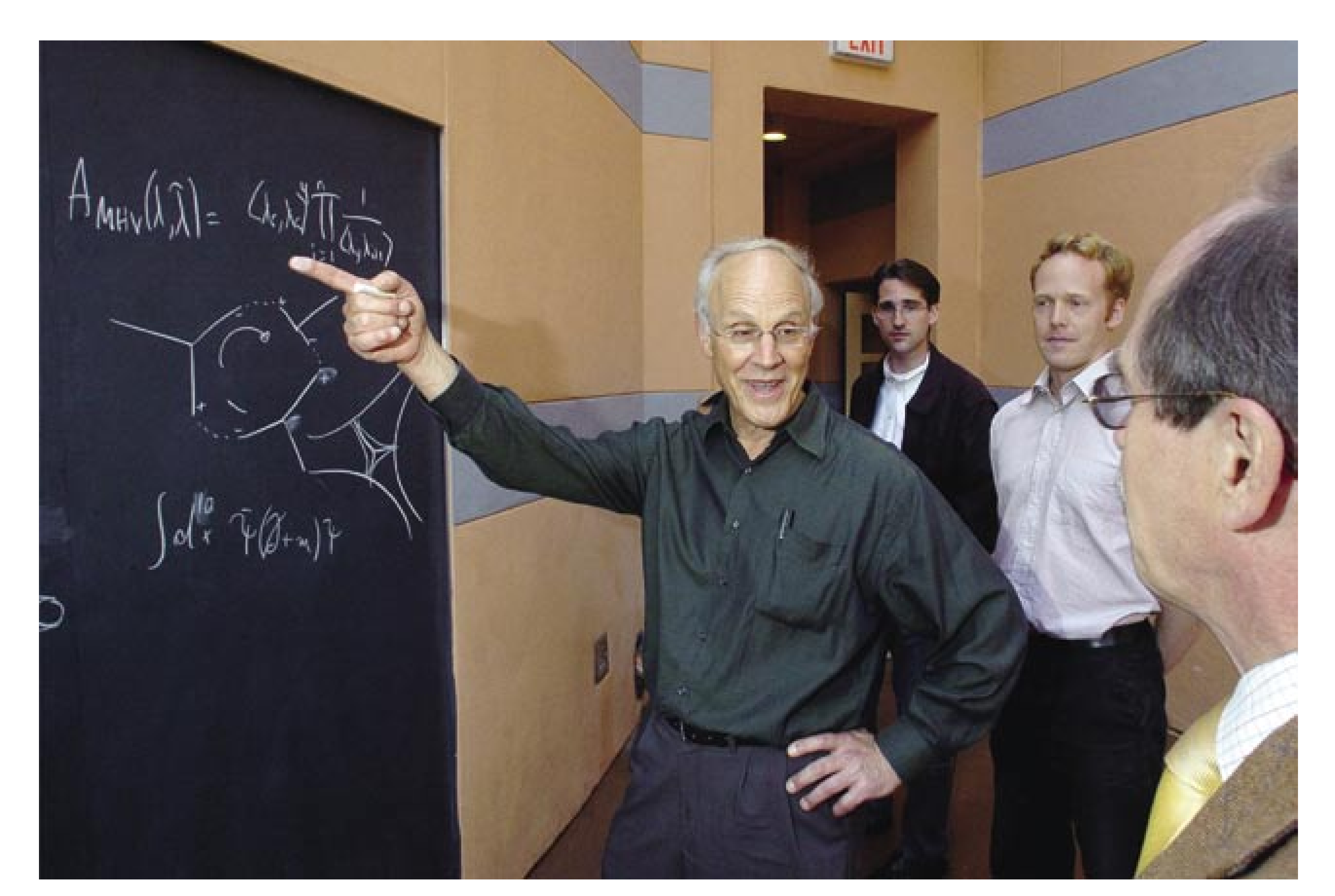
A George Gamow, el ingenioso físico teórico que tanto contribuyó a la creación de la teoría de la gran explosión ("Big Bang"), le placía explicar qué le gustaba más de su oficio: podía recostarse en un sofá y cerrar los ojos sin que nadie supiese discernir si estaba trabajando o no. Buen humor, pero mala representación del trabajo cotidiano de los físicos teóricos. Durante demasiado tiempo, físicos, historiadores y filósofos se tomaron la broma de Gamow en serio. La investigación teórica, se nos decía, se refiere a pensamientos abstractos que nada tienen que ver con esfuerzos, actividades o mañas. Las teorías, las visiones del mundo o los paradigmas parecían las unidades apropiadas de análisis; de describir el nacimiento y el desarrollo conceptual de ideas concretas se trataba.

Conforme a tal punto de vista, apenas importaba el manejo experto de instrumentos. Las ideas, incorporadas a textos, pasaban fácilmente de teórico a teórico, libres de las limitaciones materiales con que pugnaban los físicos experimentales, atados a sus microscopios electrónicos, sus aceleradores o sus cámaras de burbujas. La mente contra la mano: nuestra concepción del progreso de la física, que imagina un reino de las ideas puramente cognoscitivo, separado por completo del reino manual de la acción, plasma esa contraposición.

Esta manera de entender la actividad de los teóricos, estoy convencido, aporta más obscuridad que luz. Desde mediados del siglo XX, la mayoría de los teóricos no ha pasado sus días (ni, en verdad, sus noches) en el mundo de ensueño de los conceptos incorpóreos de algún filósofo. Su tarea principal ha sido *calcular*. Los teóricos juguetean con modelos y estiman efectos, con el objeto siempre de reducir a representaciones manejables la confusión inherente tanto a las pruebas experimentales u observables como a la posibilidad matemática. Los instrumentos de cálculo median entre diversas clases de representaciones del mundo natural y proporcionan la base del trabajo diario.

He centrado mi investigación en los útiles de trabajo de la física teórica, en particular en uno de los instrumentos más importantes con que cuentan los teóricos: los diagramas de Feynman. Desde la mitad del siglo XX, los físicos teóricos han recurrido cada vez más a esta herramienta para abordar cálculos de la mayor importancia. Los diagramas de Feynman han revolucionado casi todos los aspectos de la física teórica. Cierto es que ningún instrumento se aplica solo; menos aún interpreta los resultados a que conduce y saca conclusiones científicas de ellos. Cuando los diagramas de Feynman aparecieron en el utillaje de la física, los teóricos tuvieron que aprender a usarlos e interpretarlos. He estudiado, por lo tanto, los pasos que llevaron a que los diagramas de Feynman se ganaran su primacía.

Richard Feynman presentó sus diagramas a finales de los años cuarenta. Los ofrecía como un artificio contable que simplificaba cálculos muy largos en un área de la física: la electrodinámica cuántica (QED es su acró-



STEVE MALONE/SANTA BARBARA NEWSPRESS/*American Scientist*

1. LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN se idearon en 1948 para que la electrodinámica saliera del piélago de cálculos en que había encallado. Llenan desde entonces las pizarras del mundo entero; son métodos esenciales en los cálculos de la física teórica. Aquí, David Gross (*centro*) —en una fotografía tomada poco después de que le concedieran el premio Nobel de física del año 2004, junto a H. David Politzer y Frank Wilczek— utiliza un diagrama mientras razona sobre resultados recientes de la cromodinámica cuántica obtenidos a partir de la teoría de cuerdas con Gerardus ’t Hooft (*a la derecha*), premio Nobel de 1999, y los investigadores posdoctorales Michael Haack y Marcus Berg, de la Universidad de California en Santa Barbara. Gracias al descubrimiento de Gross, Politzer y Wilczek de 1973 se han podido aplicar con éxito los diagramas en cromodinámica cuántica.

nimo en inglés), o descripción mecanocuántica de las fuerzas electromagnéticas. Los diagramas se emplearían enseguida en física nuclear y de partículas. No mucho tiempo después, otros teóricos adoptaron —y sutilmente adaptaron— los diagramas de Feynman para solucionar problemas de muchos cuerpos en la teoría del estado sólido. Hacia finales de los años sesenta, se emplearon versiones de los dibujos de líneas de Feynman incluso para cálculos de física gravitacional. Gracias a los diagramas, todo un panorama de nuevos cálculos se abrió ante los físicos. Los teóricos efectuaron cálculos que antes de la Segunda Guerra Mundial pocos habrían soñado que fueran posibles. Cabe decir que la física no puede progresar más rápido que la destreza de los físicos en calcular. Así, de la misma manera que los cálculos con ordenador están propiciando hoy una revolución genómica, los diagramas de Feynman transformaron el modo en que los físicos veían el mundo y el lugar que ocupan en él.

Pegados al fango

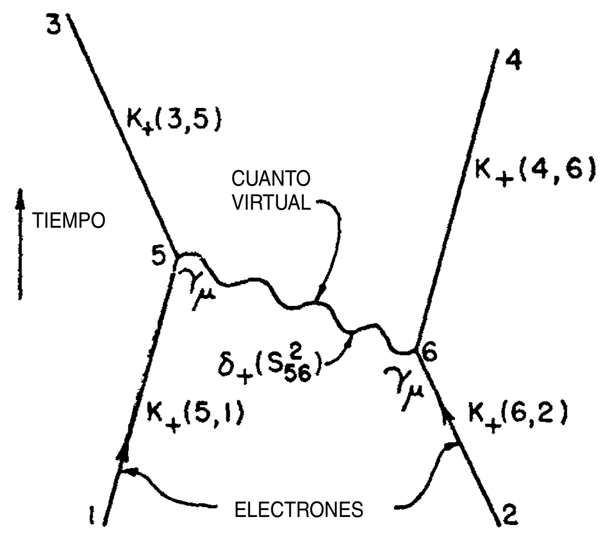
Feynman introdujo sus nuevos diagramas durante una reunión celebrada en una posada, Pocono Manor Inn, de la Pennsylvania rural. Los veintiocho físicos teóricos invitados a la reunión mantuvieron allí durante varios días de la primavera de 1948 debates muy animados. La mayoría de los teóricos jóvenes se dedicaban a los problemas de la electrodinámica cuántica. Y tales problemas eran, como dicen los físicos, “no triviales”.

La electrodinámica cuántica ofrece una explicación mecanocuántica de la fuerza electromagnética (la fuerza física por la que las cargas del mismo signo se repelen entre sí y las de signo opuesto se atraen). En la QED, los electrones y las otras partículas fundamentales intercambian fotones virtuales —fantasmagóricas partículas de luz— que sirven de portadores de esta fuerza. Una partícula virtual toma prestada energía del vacío y, por poco tiempo, existe tras salir, entiéndase al pie de la letra, de la nada. Las partículas virtuales deben devolver rápidamente la energía tomada en préstamo y abandonar su existencia; sucede a escalas de tiempo establecidas por el principio de incertidumbre de Werner Heisenberg.

Dos problemas imponentes frustraban los cálculos de la electrodinámica cuántica. Veamos el primero: desde principios de los años treinta se sabía que la QED, en



2. RICHARD FEYNMAN Y OTROS FISICOS reunidos en junio de 1947 en Shelter Island, Nueva York. La escena se produjo varios meses antes de la conferencia de Pocono Manor Inn, en la que Feynman presentó sus diagramas. De pie están Willis Lamb (*a la izquierda*) y John Wheeler. Sentados, de izquierda a derecha, Abraham Pais, Richard Feynman, Hermann Feshbach y Julian Schwinger.



3. LA COLISION ELECTRON-ELECTRON se describe mediante uno de los diagramas de Feynman que primero se publicaron. Un electrón (*línea continua de la parte inferior derecha*) emite una partícula transmisora de la fuerza —un fotón virtual (*línea ondulada*)— que incide en el segundo electrón (*línea continua de la parte inferior izquierda*). El primer electrón retrocede y el segundo se desvía de su trayectoria original. El diagrama esquematiza así la versión mecanocuántica de la repulsión entre partículas dotadas de la misma carga. Tal y como sugiere la expresión "enfoque espaciotemporal" que da título al artículo que contenía este diagrama, Feynman dibujó diagramas donde las dimensiones eran el espacio y el tiempo; aquí, el eje horizontal representa el espacio. La mayoría de los físicos dibujan hoy día los diagramas de Feynman de una manera más estilizada, que resalta la topología de las líneas de la propagación y de los vértices.

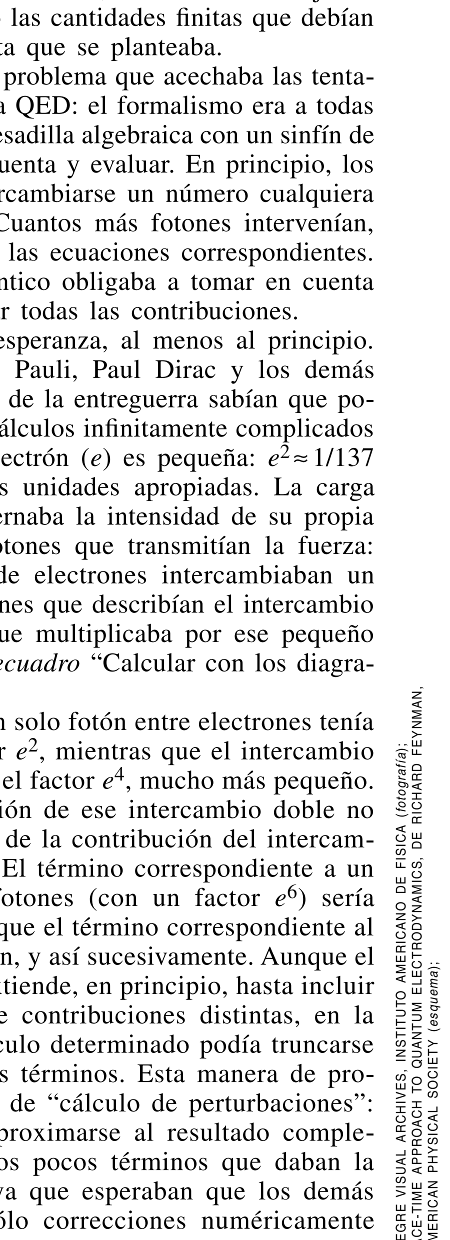
cuanto se procedía más allá de sus grados de aproximación más simples, dejaba de ofrecer respuestas finitas; los infinitos que producía entonces carecían de sentido físico. Cuando se planteaban preguntas que parecían sencillas —por ejemplo, ¿cuál es la probabilidad de que dos electrones colisionen?—, los teóricos daban respuestas razonables con aproximaciones aceptables. Pero en cuanto intentaban llevar sus cálculos más lejos, es decir, refinar sus primeras aproximaciones, las ecuaciones fallaban. El problema era que los fotones virtuales podían tomar prestada *cualquier* cantidad de energía, incluso una energía infinita, siempre que la devolvieran con la presteza debida. Los infinitos surgían por doquier en las ecuaciones; los cálculos arrojaban resultados infinitos, no las cantidades finitas que debían responder a la pregunta que se planteaba.

Pasemos al segundo problema que acechaba las tentativas de calcular con la QED: el formalismo era a todas luces incómodo, una pesadilla algebraica con un sinfín de términos a tomar en cuenta y evaluar. En principio, los electrones podían intercambiarse un número cualquiera de fotones virtuales. Cuantos más fotones intervenían, más complicadas eran las ecuaciones correspondientes. El cálculo mecanocuántico obligaba a tomar en cuenta cada situación y sumar todas las contribuciones.

No se perdió toda esperanza, al menos al principio. Heisenberg, Wolfgang Pauli, Paul Dirac y los demás arquitectos de la QED de la entreguerra sabían que podían aproximar estos cálculos infinitamente complicados porque la carga del electrón (e) es pequeña: $e^2 \approx 1/137$ cuando se escogen las unidades apropiadas. La carga de los electrones gobernaba la intensidad de su propia interacción con los fotones que transmitían la fuerza: siempre que un par de electrones intercambiaban un fotón más, las ecuaciones que describían el intercambio ganaban otro factor que multiplicaba por ese pequeño número e^2 (*véase el recuadro* "Calcular con los diagramas de Feynman").

El intercambio de un solo fotón entre electrones tenía como "peso" un factor e^2, mientras que el intercambio de dos fotones llevaba el factor e^4, mucho más pequeño. Es decir, la contribución de ese intercambio doble no será ni una centésima de la contribución del intercambio de un solo fotón. El término correspondiente a un intercambio de tres fotones (con un factor e^6) sería diez mil veces menor que el término correspondiente al intercambio de un fotón, y así sucesivamente. Aunque el cálculo completo se extiende, en principio, hasta incluir un número infinito de contribuciones distintas, en la práctica cualquier cálculo determinado podía truncarse al cabo de unos pocos términos. Esta manera de proceder lleva el nombre de "cálculo de perturbaciones": los teóricos podían aproximarse al resultado completo guardando sólo esos pocos términos que daban la mayor contribución, ya que esperaban que los demás términos aportaran sólo correcciones numéricamente insignificantes.

Este método, en apariencia tan simple, presentaba en la práctica dificultades extraordinarias. Uno de los doctorandos de Heisenberg había afrontado un cálculo en e^4 a mitad de los años treinta —sólo la primera ronda de términos correctivos—; enseguida se topó con cientos



CALCULAR CON LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN

LOS DIAGRAMAS DE FEYNMAN son una potente herramienta para calcular en la teoría cuántica. Como en cualquier cálculo mecanocuántico, se trata de obtener un número complejo, o "amplitud", cuyo módulo al cuadrado da una probabilidad. Por ejemplo, $A(t, \mathbf{x})$ podría representar la amplitud de que una partícula se encuentre en el punto $\mathbf{x}$ en el instante t; entonces, la probabilidad de encontrar la partícula allí en aquel instante será $|A(t, \mathbf{x})|^2$.

En QED, las amplitudes se componen de algunos ingredientes básicos, cada uno de los cuales tiene una expresión matemática asociada. Como ejemplo, podría escribirse:

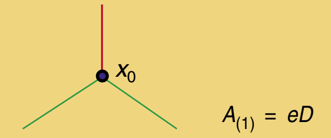
- amplitud de que un electrón virtual viaje imperturbado de x a y: $B(x,y)$;
- amplitud de que un fotón virtual viaje imperturbado de x a y: $C(x,y)$; y
- amplitud de que el electrón y el fotón choquen: eD.

Aquí e es la carga del electrón, que gobierna la intensidad con la que interaccionan los electrones y los fotones.

Feynman introdujo sus diagramas para tener en cuenta todas estas posibilidades. Las reglas de uso de los diagramas no son complicadas. En cada "vértice" se dibujan dos líneas de electrón que se encuentran con una línea de fotón. Se dibujan todas las maneras topológicamente distintas en que los electrones y los fotones pueden colisionar.

Se construye luego una ecuación: se ponen los factores $B(x,y)$ en cada línea virtual electrónica, $C(x,y)$ en cada línea virtual fotónica, eD en cada vértice y se integra sobre todos los puntos donde intervengan partículas virtuales. Como e es tan pequeño ($e^2 \sim 1/137$, en unidades apropiadas), los diagramas que tengan menos vértices tienden a contribuir más a la amplitud total que los diagramas complicados, que contienen muchos factores iguales a este pequeño número. Los físicos pueden aproximar una amplitud A construida así escribiéndola como una serie de términos cada vez más complicados.

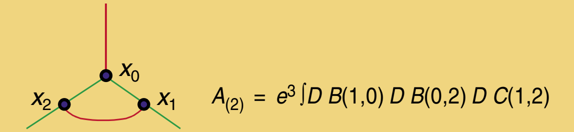
Por ejemplo, consideremos la dispersión de un electrón por un campo electromagnético. Según la mecánica cuántica, el campo se puede describir como una colección de fotones. En el caso más simple, el electrón (*línea verde*) colisionará sólo una vez con un único fotón (*línea roja*) en sólo un vértice (*el círculo azul en el punto x_0*):



$$A_{(1)} = eD$$

En este diagrama aparecen sólo partículas reales, no virtuales, de manera que la única contribución a la amplitud viene del vértice.

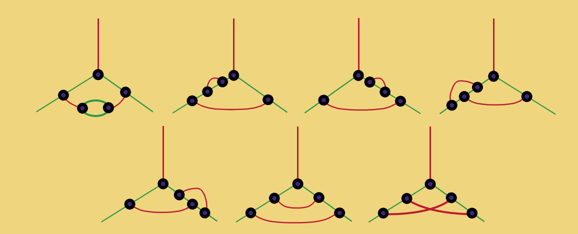
Pero al electrón pueden acaecerle otros fenómenos. En el siguiente nivel de complejidad, el electrón entrante puede desprender un fotón virtual antes de colisionar con el campo electromagnético y reabsorber el fotón virtual en un punto posterior:



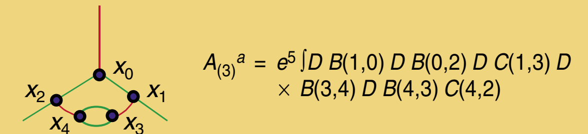
$$A_{(2)} = e^3 \int D\, B(1,0)\, D\, B(0,2)\, D\, C(1,2)$$

En este diagrama más complicado, las líneas del electrón y las líneas del fotón se encuentran en tres lugares y, por lo tanto, la amplitud para esta contribución es proporcional a e^3.

Aún pueden suceder cosas más complicadas. En el nivel siguiente de complejidad, aparecen siete diagramas de Feynman distintos:



Como ejemplo, traduzcamos el diagrama superior izquierdo en su amplitud asociada:



$$A_{(3)}{}^{a} = e^5 \int D\, B(1,0)\, D\, B(0,2)\, D\, C(1,3)\, D \times B(3,4)\, D\, B(4,3)\, C(4,2)$$

La amplitud total de que un electrón interaccione con el campo electromagnético se escribe entonces:

$$A = A_{(1)} + A_{(2)} + A_{(3)}{}^{a} + A_{(3)}{}^{b} + A_{(3)}{}^{c} + \ldots$$

y la probabilidad de esta interacción es $|A|^2$.

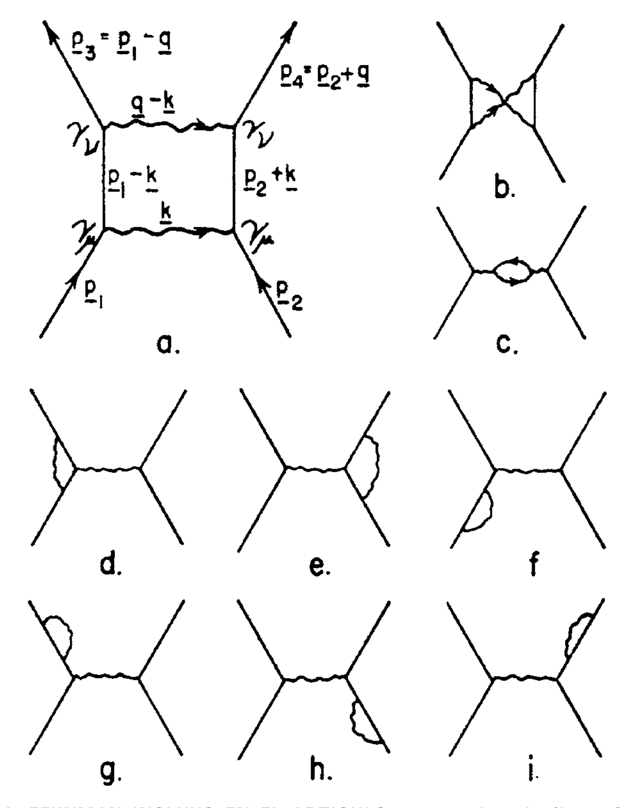
Robert Karplus y Norman Kroll abordaron este tipo de cálculos con diagramas de Feynman en 1949; ocho años más tarde, otros encontraron una serie de errores algebraicos en el cálculo, cuya corrección sólo afectaba a la quinta cifra decimal de su respuesta original. Desde los años ochenta, Tom Kinoshita (de Cornell) ha recorrido todo el itinerario hasta los diagramas que contienen ocho vértices, un cálculo que abarca 891 diagramas de Feynman distintos, con una precisión de hasta trece cifras decimales

de términos distintos. Cada contribución al cálculo total ocupaba más de cuatro o cinco líneas de símbolos matemáticos. ¡Qué fácil era que en esa maraña algebraica se juntasen, o peor aún, se omitieran términos! Divergencias sin resolver y cuentas inabordables: a principios de la Segunda Guerra Mundial, la electrodinámica cuántica, refractaria al cálculo y conceptualmente confusa, parecía un embrollo maldito.

El remedio de Feynman

En su charla de la Pocono Manor Inn, Feynman sostuvo que los diagramas ofrecían una nueva esperanza de superar los escollos de los cálculos electrodinámicos. Uno de los primeros ejemplos que presentó fue la colisión de dos electrones. Dibujó un sencillo diagrama en la pizarra, similar al incluido más tarde en su primer artículo sobre las nuevas técnicas diagramáticas (*véase la figura 3*). El diagrama representaba sucesos en dos dimensiones: el espacio en el eje horizontal y el tiempo en el vertical.

El diagrama, explicó, proporcionaba una taquigrafía para una descripción matemática, unívocamente asociada a los elementos del grafo. Un electrón tenía una cierta probabilidad de moverse como partícula libre del punto x_1 al x_5. Feynman llamó a esta probabilidad $K_+(5,1)$. El otro electrón entrante se movía libremente —con probabilidad $K_+(6,2)$— del punto x_2 al x_6. Este segundo electrón podía entonces emitir un fotón virtual en x_6, que a su vez se movería —con probabilidad $\delta_+(s_{56}{}^2)$— hasta x_5, donde el primer electrón lo absorbería. (Aquí s_{56} representaba la distancia en el espacio y el tiempo que recorría el fotón.)



4. FEYNMAN INCLUYO EN EL ARTICULO que contiene la figura 3 una muestra de que los diagramas sirven para "contabilizar": este conjunto de diagramas recoge las formas posibles en que dos electrones intercambian dos fotones. Cada diagrama corresponde a una integral única; todos tuvieron que ser evaluados y agregados como parte del cálculo de la probabilidad de que dos electrones colisionen.



5. FREEMAN DYSON (*derecha*), retratado con Victor Weisskopf en un barco con rumbo a Copenhague en 1952, contribuyó como nadie a la difusión de los diagramas de Feynman. La deducción y la explicación de Dyson de los diagramas indicaban su método de aplicación. Los investigadores posdoctorales a los que instruyó en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, durante el tiempo que pasó allí, extendieron el uso de los diagramas a otras instituciones.

La emisión o absorción de un fotón por un electrón llevaba asociado un factor $e\ \gamma_\mu$, donde e era la carga del electrón y γ_μ un vector de matrices de Dirac (disposiciones de números ligados al espín del electrón). Habiendo cedido parte de su energía y de su momento, el electrón de la derecha se movería de x_6 a x_4, de manera parecida a como un cazador retrocede al disparar el rifle. El electrón de la izquierda, mientras tanto, tras absorber el fotón y, por lo tanto, ganar algo de energía y de momento, se dispersaría de x_5 a x_3. En manos de Feynman, este diagrama representaba la expresión matemática (escrita con las abreviaturas K_+ y δ_+):

$$e^2\iint d^4x_5 d^4x_6 K_+(3,5)K_+(4,6)\gamma_\mu\delta_+(s_{56}^2)\gamma_\mu K_+(5,1)K_+(6,2)$$

En este proceso tan sencillo, los dos electrones intercambian un solo fotón. Las líneas rectas de los electrones tocan la línea ondulada del fotón en dos puntos, o "vértices". El término matemático asociado, por lo tanto, contiene dos factores de la carga del electrón e, uno por cada vértice. Cuando se eleva al cuadrado, esa expresión da una estimación bastante buena de la probabilidad de que dos electrones colisionen. Pero tanto Feynman como sus oyentes sabían que ahí sólo empezaba el cálculo. En principio, ya lo hemos dicho, los dos electrones podían intercambiar cualquier número de fotones.

Feynman, pues, empleó sus nuevos diagramas para describir las distintas posibilidades. Había nueve maneras diferentes de que los electrones pudieran intercambiar dos fotones, cada una de las cuales contaba con cuatro vértices (y, por tanto, sus expresiones matemáticas asociadas contendrían e^4 en vez de e^2). Como en el caso más simple (que implica sólo un fotón), Feynman podía construir la contribución matemática de cada uno de estos diagramas introduciendo K_+ y δ_+ para cada línea de electrón y de fotón, y conectándolos en los vértices con los factores $e\ \gamma_\mu$.

La diferencia principal con el caso de un solo fotón estribaba en que la mayor parte de las integrales de los diagramas de dos fotones, tal y como se había estado encontrando durante veinte años de cálculos sin diagramas, daban infinito en vez de un resultado finito. Feynman mostró a continuación que algunos de los infinitos molestos se podían eliminar mediante una "renormalización", una combinación de trucos de cálculo, algunos de su propia invención, algunos tomados de otros autores. El orden de las operaciones era importante: Feynman partía de los diagramas en cuanto ayuda mnemotécnica para escribir las integrales pertinentes, y sólo más tarde modificaba éstas para quitarles, una a una, los infinitos.

Al organizar el cálculo con los diagramas, Feynman había resuelto un viejo quebradero de cabeza que llevaba años lastrando a los mejores físicos teóricos del mundo. Podríamos esperar que sus colegas de la Pocono Manor Inn apreciasen, al menos, lo que había logrado. Pero las cosas no fueron bien en la reunión. En primer lugar, las circunstancias se acumularon en contra de Feynman: su presentación siguió a una maratoniana conferencia —un día entero— de Julian Schwinger, el "niño prodigio" de Harvard. Schwinger había llegado, sin recurrir a diagramas, a un método diferente de eliminar los infinitos

de los cálculos de la QED. Durante la exposición, los asistentes no se movieron de sus asientos, salvo una breve interrupción para comer.

Pronunciada a última hora del día, la disertación de Feynman fue precipitada y dispersa. Nadie pareció capaz de seguir lo que hacía. Sufrió interrupciones frecuentes de físicos del fuste de Niels Bohr, Paul Dirac y Edward Teller, que insistían en querer saber cómo esos garabatos encajaban en los principios de la física cuántica. Otros, exasperados, preguntaban más en general por las reglas que regían el uso de los diagramas. Según todos los testimonios posteriores, Feynman abandonó la reunión decepcionado, deprimido incluso.

Se ha recordado a menudo la frustración de Feynman por lo que le ocurrió en Pocono. Sin embargo, al contarlo se ha pasado siempre por alto que la confusión perduró hasta transcurrido mucho tiempo de aquella presentación tan poco prometedora. A los propios amigos y colegas más cercanos a Feynman les costaba entender de dónde salían los diagramas o cómo se debían usar. Ni siquiera Hans Bethe, experto de la QED reconocido en todo el mundo y compañero, ya consagrado, de Feynman en Cornell, y Ted Welton, que hizo la carrera con Feynman y por entonces también especialista de la QED, entendían lo que Feynman hacía; le pidieron repetidas veces que les ayudara a ejercitarse en el cálculo.

Otros teóricos que habían asistido a la reunión de Pocono, entre ellos Robert Marshak, de Rochester, no salieron de su desconcierto al intentar aplicar las nuevas técnicas; tuvieron que pedirle a Feynman que les hiciera las cuentas, ya que eran incapaces de emprender los cálculos diagramáticos por sí mismos. Mientras tanto, durante el invierno de 1950, un estudiante de doctorado y dos asociados posdoctorales se intercambiaron cartas cada vez más detalladas; intentaban comprender por qué estaban obteniendo respuestas diferentes al usar los diagramas para, se suponía, un mismo cálculo. Aún en 1953 —cinco años después de que Feynman hubiera revelado su nueva técnica en la reunión de Pocono—, Leonard Schiff, teórico destacado de Stanford, escribía en una carta de recomendación de un estudiante de doctorado que éste entendía las técnicas diagramáticas y las aplicaba en su tesis. Como deja claro la carta de Schiff, no se podía dar por descontado que los doctorandos entendieran los diagramas de Feynman o estuviesen acostumbrados a aplicarlos. Las nuevas técnicas no eran ni automáticas, ni obvias para muchos físicos. Los diagramas no se difundieron solos.

Dyson y los posdoctorales apostólicos

Su uso se extendió gracias, sobre todo, a los esfuerzos de un joven cercano a Feynman, Freeman Dyson. Dyson estudió matemáticas en Cambridge, antes de trasladarse a Estados Unidos para seguir cursos de doctorado de física teórica. Llegó a Cornell en el otoño de 1947 para estudiar con Hans Bethe. En el transcurso de aquel año también empezó a encontrarse con Feynman, justo cuando éste trabajaba en su nuevo enfoque de la QED. Dyson y Feynman hablaron a menudo durante la primavera de 1948 de los diagramas de Feynman y de cómo podían usarse, conversaciones que prosiguieron con mayor intensidad cuando los dos hicieron un viaje en coche por el país aquel verano, unos meses después de la exposición de Feynman en Pocono Manor.

Más avanzado el estío, Dyson asistió a la escuela de verano de física teórica de la Universidad de Michigan, donde destacaron las detalladas conferencias de Julian Schwinger acerca de su propia aproximación no diagramática a la renormalización. La escuela de verano ofreció a Dyson la oportunidad de hablar de manera informal y extensa con Schwinger tal y como ya había hecho con Feynman. Así, hacia septiembre de 1948, Dyson, y sólo Dyson, había pasado un tiempo intenso y concentrado hablando con ambos, Feynman y Schwinger, sobre sus respectivas nuevas técnicas. Al final del verano, marchó al Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, en Nueva Jersey.

Poco después de su llegada a Princeton, envió un artículo a *Physical Review* que comparaba los métodos de Feynman y Schwinger. (También analizaba los métodos del teórico japonés Sin-itiro Tomonaga, quien había trabajado sobre el problema durante y después de la guerra; poco después de la guerra, Schwinger llegó, por su lado, a un enfoque muy similar al de Tomonaga.) Más que compararlos, Dyson demostró la equivalencia matemática de los tres métodos, y ello antes de que Feynman hubiera escrito un solo artículo sobre sus nuevos diagramas. El temprano artículo de Dyson, y un extenso artículo que lo continuaba, remitido aquel invierno para su publicación, aparecieron meses antes que los propios trabajos de Feynman. Incluso años después de que los artículos, ya famosos, de Feynman saliesen impresos, el par de artículos de Dyson se citaba más a menudo que los de Feynman.

En estos primeros trabajos, Dyson dedujo reglas para el empleo de los diagramas, precisamente lo que los frustrados oyentes de Feynman en la reunión de Pocono habían encontrado a faltar. Los artículos de Dyson ofrecieron una guía de "uso" que incluía las instrucciones, paso a paso, de cómo debían dibujarse los diagramas y traducirse en sus expresiones matemáticas asociadas. Además de sistematizar los diagramas de Feynman, Dyson dedujo la forma y el uso de los diagramas a partir de principios básicos, asunto que Feynman no había aborda-

TABLA 8-2

Correspondencia entre diagramas y elementos de la matriz S en el espacio de momentos

Componente del diagrama		Factor en el elemento de matriz S	
Línea interna de fotón	ν - - - → - - - λ	$g_{\nu\lambda} \frac{1}{k^2 - i\mu}$	función de propagación del fotón
Línea interna de electrón	•——→——•	$\frac{ip - m}{p^2 + m^2 - i\mu}$	función de propagación del electrón
Vértice	p', p, ν k	$\gamma^\nu \delta(p - p' - k)$	

6. A MEDIADOS DE LOS AÑOS CINCUENTA, corrían tablas prácticas como ésta; en ellas, los físicos jóvenes aprendieron a traducir cada pieza de sus diagramas de Feynman en la expresión matemática correspondiente.

REIMPRESO DE J. JAUCH AND F. ROHRLICH, *THE THEORY OF PHOTONS AND ELECTRONS*, ADDISON-WESLEY, 1955



7. DESPUES DE LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL, la escala del equipamiento utilizado por los físicos de altas energías en los Estados Unidos creció enormemente. Aquí, E. O. Lawrence y su grupo posan con el recién renovado sincrociclotrón de 4,67 metros del Laboratorio de Radiación de Berkeley, en 1946. Tales aceleradores de partículas atrajeron grandes equipos de físicos experimentales, que enseguida se encontraron con todo un "zoo" de nuevas partículas. Estudiar su comportamiento se convirtió en tarea rutinaria.

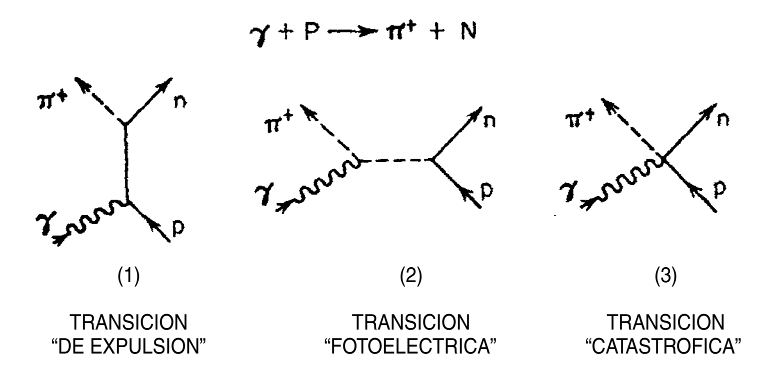
do en absoluto. Más allá de todas estas explicaciones y deducciones, Dyson demostró cómo, diagramas en mano, se podían eliminar sistemáticamente los preocupantes infinitos de la QED de *cualquier* cálculo, por complicado que fuera. Hasta entonces, Tomonaga, Schwinger y Feynman habían trabajado sólo con la primera ronda de términos de corrección perturbativos, y sólo en el contexto de unos pocos problemas específicos. A partir de la topología de los diagramas, Dyson generalizó los ejemplos analizados y demostró que los problemas de la QED se podían renormalizar.

Mayor importancia que sus artículos tuvo el que Dyson convirtiera el Instituto de Estudios Avanzados en una fábrica de diagramas de Feynman. Para entender ese proceso, resulta obligado retroceder y considerar los cambios en la educación posdoctoral de los físicos durante este período. Antes de la Segunda Guerra Mundial, sólo una pequeña parte de los físicos que acababan su doctorado en los Estados Unidos seguían una educación posdoctoral; por entonces, era todavía corriente empezar a trabajar en la industria o en la universidad nada más terminar el doctorado. En el caso de los físicos teóricos —antes de la guerra, todavía una pequeña minoría entre los físicos estadounidenses—, los que continuaban su educación posdoctoral viajaban, por lo general, a reputados centros europeos. Sólo era en Cambridge, Copenhague, Gotinga o Zúrich donde estos jóvenes teóricos norteamericanos "aprendían la música", según la frase famosa de I. I. Rabi, y no sólo "il libretto" de la investigación en física. Al volver, muchos de estos físicos —entre ellos Edwin Kemble, John Van Vleck, John Slater y J. Robert Oppenheimer, así como el propio Rabi— se dedicaron a organizar en su país los fundamentos de la educación posdoctoral de los teóricos jóvenes.

Poco después de la guerra, el Instituto de Estudios Avanzados, bajo la dirección de Oppenheimer, se convirtió en uno de los centros clave para que los teóricos jóvenes completasen el trabajo posdoctoral. Con la fama mundial que tenía por haber dirigido el laboratorio de guerra de Los Alamos, Oppenheimer se había convertido en una persona muy solicitada. Dejó su plaza de Berkeley en 1947 para dirigir el Instituto de Princeton, en parte porque así podría atender desde más cerca sus nuevos deberes de consultor en Washington. Puso como condición para aceptar el puesto que se le permitiera aumentar el número de miembros jóvenes, temporales, de la plantilla de física; es decir, quería convertir el Instituto en un centro de educación posdoctoral de los físicos teóricos. No tardó el centro en constituirse en el lugar deseado por los teóricos jóvenes para cumplir dos años de estancia posdoctoral.

Este "hotel intelectual", así lo llamó Oppenheimer, de investigadores posdoctorales, sería crucial para la difusión de los diagramas de Feynman. Cuando Dyson llegó en el otoño de 1948 —justo un año después de que se nombrara a Oppenheimer director y empezase a poner en práctica su proyecto de que en el instituto se impartieran estudios posdoctorales—, encontró allí a otros once teóricos en ciernes. Uno de los nuevos edificios del Instituto, el que, se suponía, contendría los despachos de esos visitantes, no se acabó a tiempo, y el equipo de posdoctorales hubo de pasar la mayor parte de aquel semestre en mesas contiguas de un solo despacho. Tanta cercanía alentó la colaboración. Dyson destacó muy pronto; enseñó a sus compañeros la técnica de los diagramas y coordinó una serie de cálculos que se efectuaron en colaboración por medio de los diagramas.

Entre esos cálculos sobresalió el que publicaron Robert Karplus y Norman Kroll, del Instituto. Una vez los hubo Dyson iniciado en el método, emprendieron las correcciones en e^4 del momento magnético del electrón; es decir, calcularon la intensidad con que un campo electromagnético externo afectaba a un electrón con espín. Se trataba de un cálculo monumental que abarcaba una larga lista de complicados diagramas de Feynman. Al construir cada pareja de diagramas e integrales como Dyson les había enseñado, demostraron que un electrón debería tener un momento magnético de 1,001147 en



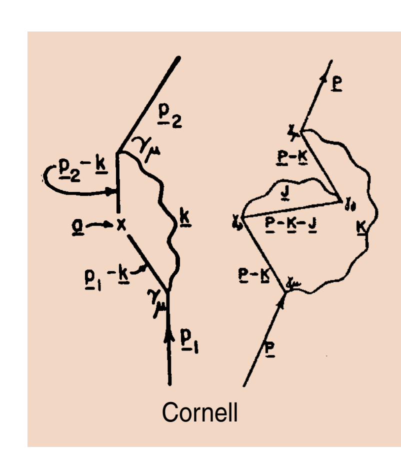
8. ENFRENTADOS CON LA AFLUENCIA de nuevas partículas e interacciones, algunos físicos teóricos comenzaron a utilizar los diagramas de Feynman para representar procesos físicos. Confiaban en que los diagramas de Feynman les ayudarían a clasificar las nuevas reacciones nucleares, aun cuando ya no se pudieran realizar cálculos perturbativos.

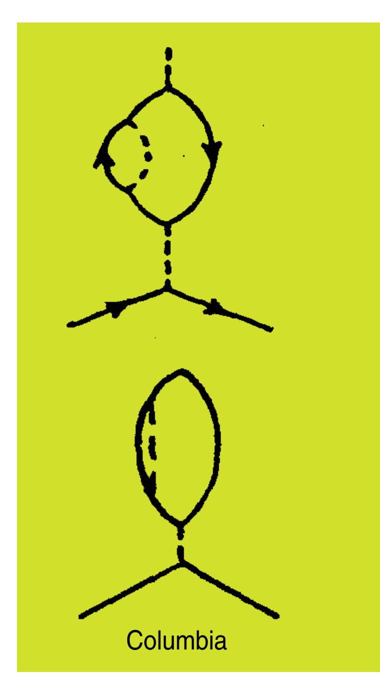
CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL LAWRENCE BERKELEY (*fotografía*); REIMPRESO DE MARSHAK 1952 (*esquema*)/*American Scientist*

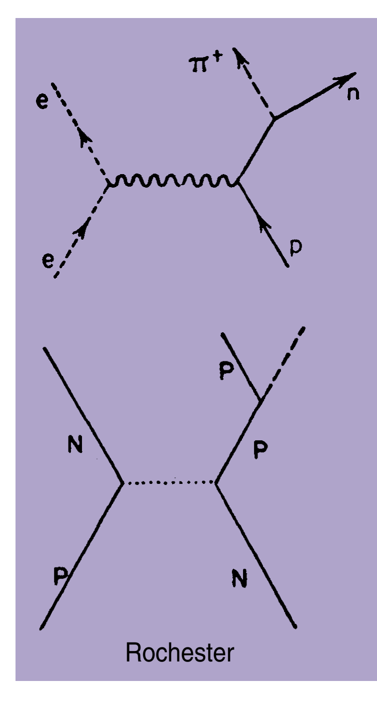
vez de 1 (en las unidades apropiadas), una respuesta con una exactitud de seis cifras que concordaba increíblemente bien con las últimas mediciones experimentales. Tras "muchas y provechosas discusiones con F. J. Dyson", Karplus y Kroll mostraron así que gracias a los diagramas de Feynman se llevaban a cabo cálculos de los que nadie había soñado que fueran factibles.

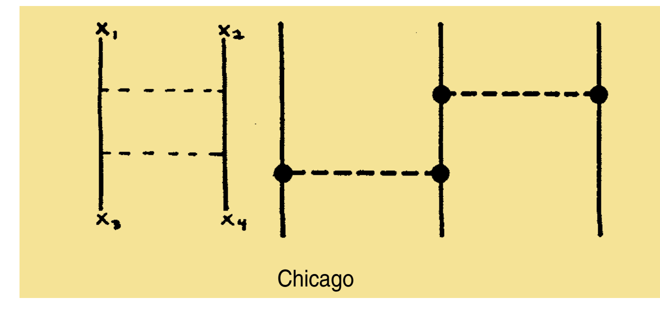
Los posdoctorales de Princeton, formados por Dyson en los cálculos diagramáticos, pronto dejaron el Instituto para ocupar puestos docentes. Más de las cuatro quintas partes de los artículos que usaron diagramas de Feynman en la principal revista norteamericana de física, *Physical Review*, entre 1949 y 1954 llevaban la firma de estos posdoctorales, de doctorandos o de otros colegas, a quienes ellos, ya en sus nuevas plazas, habían instruido. La gran mayoría de los 114 autores que utilizaron los diagramas en *Physical Review* durante este período habían aprendido de Dyson las técnicas, o de alguien a quien Dyson había enseñado. (Los demás autores, excepto dos, habían tenido alguna relación directa con Feynman.) El capítulo de reconocimientos en las disertaciones de los doctorandos de departamentos de Berkeley, Chicago, ciudad de Iowa, Bloomington, Madison, Urbana, Rochester e Ithaca confirman el papel de los posdoctorales del Instituto en la propagación de las nuevas técnicas y en la enseñanza de su aplicación a sus propios alumnos. Los diagramas de Feynman se extendieron así por todos los EE.UU. gracias a la cascada de posdoctorales que salían del Instituto de Estudios Avanzados.

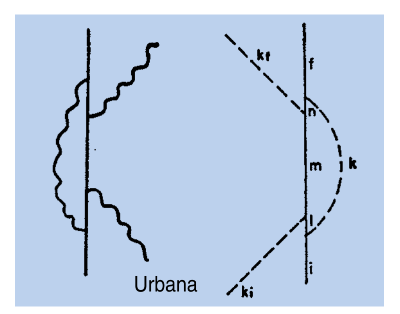
Años más tarde, Schwinger diría con sarcasmo que los diagramas de Feynman habían "llevado el cálculo a las masas". Los diagramas, recalcaba, eran un asunto, como mucho, de "pedagogía, no de física". Ciertamente eran un asunto de pedagogía. Si se considera quiénes eran los autores de estos artículos diagramáticos, queda clara la misión pedagógica de los posdoctorales: más del 80 por ciento de tales autores estaba todavía en pleno período de formación cuando aparecieron

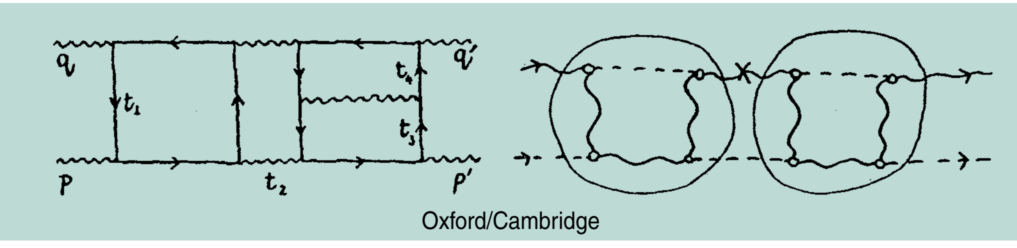












9. A MEDIDA QUE SE EXTENDIAN LOS NUEVOS DIAGRAMAS, mentores y alumnos los fueron dibujando con diversos propósitos. Se reconocen "semejanzas de familia" en estos pares. En cada caso, el primer diagrama (*izquierda* o *arriba*) viene de un joven instructor, y el segundo, de alguien a quien había formado. Fuentes: *Cornell*: R. Feynman, The Theory of Positrons, *Physical Review* 76: 749-759; R. M. Frank, The fourth-order contribution to the self-energy of the electron, *Physical Review* 83: 1189-1193, 1951; *Columbia*: R. Karplus y N. M. Kroll, Fourth-order Corrections in Quantum Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron, *Physical Review* 77: 536-549, 1950; J. Weneser, R. Bersohn y N. M. Kroll, Fourth-order radiative corrections to atomic energy levels, *Physical Review* 91: 1257-1262, 1953; *Rochester*: R. E. Marshak, *Meson Physics*, McGraw-Hill, 1952; A. Simon, Bremsstrahlung in high energy nucleon-nucleon collisions, *Physical Review* 79: 573-576, 1950; *Chicago*: M. Gell-Mann y F. E. Low, Bounds states in quantum field theory, *Physical Review* 84: 350-354, 1951; G. Wentzel, Three-nucleon interactions in Yukawa theory, *Physical Review* 89: 684-588, 1953; *Urbana*: F. E. Low, Natural line shape, *Physical Review* 88: 53-57; 1952, G. F. Chew, Renormalization of mesons theory with a fixed extended source, *Physical Review* 94: 1748-1754, 1954; *Oxford y Cambridge*: A. Salam, Overlapping divergences and the S-matrix, *Physical Review* 82: 217-227, 1951; J. C. Ward, Renormalization theory of the interactions of nucleons, mesons and photons, *Physical Review* 84: 897-901, 1951.

los diagramas de Feynman. Los demás comenzaron a usar los diagramas mientras eran instructores jóvenes o profesores ayudantes, menos de siete años después de haberse doctorado. Los físicos de más edad no se "reciclaron".

Pese a ello, los diagramas no llegaron a todas partes. Individuos, e incluso departamentos enteros, que no entraron en contacto con los posdoctorales recién dispersados prescindían de los diagramas años después de que se hubiesen impreso las instrucciones de empleo. Uno de primeros conversos de Dyson en el Instituto, Fritz Rohrlich (autor de un manual pionero sobre las nuevas técnicas diagramáticas), tuvo que aconsejar a un estudiante de doctorado de la Universidad de Pennsylvania que escogiese un tema de disertación diferente o cambiara de centro; sin ningún representante de la red de Princeton en la ciudad, el alumno no llegaría a dominar los métodos diagramáticos.

Como los físicos comprendieron, se requería mucho más que artículos de investigación publicados o textos pedagógicos para difundir los diagramas. La dirección personal en la formación y el acierto en los nombramientos de los posdoctorales constituían la clave. Mecanismos de transferencia muy similares extendieron los diagramas a jóvenes teóricos de Gran Bretaña y Japón; mientras, el endurecimiento de la guerra fría ahogaba la difusión de los diagramas entre los físicos de la Unión Soviética. Sólo con el retorno a las conferencias mixtas entre norteamericanos y soviéticos a mediados de los años cincuenta, bajo la iniciativa de "Atomos para la Paz", empezaron los físicos soviéticos a utilizar los diagramas de Feynman con la misma soltura que los demás países.

Los diagramas dominan

Comentarios desdeñosos de Schwinger aparte, resultaba innegable la eficacia de los diagramas de Feynman en los cálculos perturbativos de la QED. Habida cuenta de la naturaleza laberíntica de los términos correctivos en estos cálculos, y de la rapidez con que podían resolverse gracias a los diagramas, cabría esperar que se hubieran difundido y aplicado ampliamente con ese fin. Pero no fue así. Sólo un grupo restringido publicó cálculos perturbativos de orden elevado semejantes a los de Karplus y Kroll, donde los diagramas llevasen la cuenta de las perturbaciones decrecientes de la QED. Menos del 20 por ciento de los artículos diagramáticos aparecidos en *Physical Review* entre 1949 y 1954 emplearon así los diagramas.

En cambio, los diagramas se usaron cada vez con mayor frecuencia para estudiar no las interacciones electrodinámicas entre electrones y fotones, sino partículas e interacciones nucleares. En los nuevos aceleradores de partículas estaban apareciendo docenas de nuevas partículas nucleares, como los *mesones,* de las que ahora se sabe que consisten en partículas compuestas, estados ligados de los quarks y sus homólogos de antimateria. Analizar el comportamiento de todas estas nuevas partículas se convirtió en un tema de sumo interés, tanto experimental como teórico.

Pero los diagramas no tenían un lugar obvio en los nuevos estudios. Feynman y Dyson habían concebido sus técnicas diagramáticas para la electrodinámica, una interacción débil; ahora bien, las partículas nucleares se hallan sujetas a una interacción fuerte. En razón de su nimiedad, se podía explotar la carga del electrón en los cálculos perturbativos de la electrodinámica cuántica; en cambio, varios experimentos indicaron que la intensidad de la fuerza de acoplamiento entre las partículas nucleares (g^2) era mucho mayor, entre 7 y 57, no 1/137. Si se abordaba la colisión entre las partículas nucleares del mismo modo que se trataba la colisión electrón-fotón, con una larga serie de diagramas de Feynman de complejidad progresiva, cada uno de los cuales contuviese más y más vértices, los diagramas de orden superior incluirían factores adicionales del número grande g^2. A diferencia de la situación en la QED, estos complicados diagramas, con muchos vértices y, por lo tanto, con muchos factores g^2, superarían con creces las contribuciones de orden más bajo. De ahí que Feynman le advirtiese a Enrico Fermi a finales de 1951 de que no se creyese ningún cálculo de la teoría de mesones que usara diagramas de Feynman.

A pesar de la admonición de Feynman, numerosos teóricos jóvenes se mantuvieron ocupados (y todavía es así hoy en día) con los cálculos diagramáticos de las fuerzas nucleares. Más de la mitad de los artículos diagramáticos de *Physical Review* entre 1949 y 1954 aplicaban los diagramas a temas nucleares; entre ellos, los cuatro primeros artículos llenos de diagramas que se publicaron tras los escritos por Feynman y Dyson. En vez de descartar los diagramas cuando no eran aplicables los métodos perturbativos, los teóricos se aferraron a sus líneas escuetas e idearon nuevos usos e interpretaciones.

Algunos utilizaban los diagramas como representaciones físicas de las colisiones que se producían en los nuevos aceleradores. Rodeados en un "zoo" de partículas nucleares que surgían en esas máquinas, los teóricos recurrían a los diagramas para llevar un estadillo de las partículas y de los tipos de interacciones en que participaban, un tipo de contabilidad más próxima a la clasificación botánica que al cálculo perturbativo. Otros los usaron como un modo rápido de discriminar entre efectos físicos contrapuestos: si un diagrama contenía dos vértices de fuerza nuclear (g^2), pero sólo un vértice de fuerza electromagnética (e), podía esperarse que el correspondiente proceso físico contribuyera con un peso mayor que un diagrama con dos factores de e y sólo una g, aun cuando ninguno de los diagramas pudiera recibir una evaluación formal. A principios de los años sesenta, el grupo de Geoffrey Chew en Berkeley llevó los diagramas aún más lejos. Se afanaron por sacarlos del marco teórico apuntalado por Dyson; perseguían fundar en ellos una nueva teoría de las partículas nucleares que reemplazase al propio marco del que se los había deducido.

Durante las décadas de 1950 y 1960, no dejó de estirarse el cordón umbilical que unía los diagramas con las elegantes instrucciones, sometidas a reglas precisas, que Dyson había dictado para su empleo. Desde el primer momento, se jugó con los diagramas —añadiendo un tipo nuevo de línea aquí, abandonando una anterior convención del uso de las flechas allá, rotulando de

distintas maneras— para destacar los elementos que en cada momento se juzgasen de mayor importancia. Ese pastiche visual, sin embargo, no se compuso al azar. Fueron surgiendo escuelas locales a medida que mentores y pupilos adecuaban los diagramas para mejor satisfacer sus intereses de cálculo. Los diagramas dibujados por los doctorandos de Cornell se fueron pareciendo cada vez más entre sí y menos a los dibujados por los estudiantes de Columbia, Rochester o Chicago. La pedagogía confirió una impronta diferenciadora a los diagramas en la misma medida en que fomentó su circulación.

Los teóricos se sentían obligados a ahondar en su adaptación de los diagramas de Feynman al estudio de las partículas de interacción fuerte, aun cuando los cálculos perturbativos se habían demostrado imposibles. Un físico comparó la voluntad de usar diagramas de Feynman en la física nuclear, a pesar de la constante de acoplamiento, "al tipo de craniometría que estuvo de moda en el siglo diecinueve"; ambas cosas "venían a tener el mismo sentido". Sólo se tuvo un patrón coherente de reglas para los cálculos perturbativos de fuerzas nucleares en 1973, cuando David Politzer, David Gross y Frank Wilczek descubrieron la "libertad asintótica" en la cromodinámica cuántica (QCD), teoría de la fuerza nuclear fuerte. (El trío recibió el premio Nobel de 2004 por ello.) Pero en el cuarto de siglo transcurrido entre la aparición de los diagramas de Feynman y ese descubrimiento, los físicos, sin ninguna teoría que los dirigiese, garabatearon diagramas de Feynman sin cesar. Otro premio Nobel, Philip Anderson, se preguntaba recientemente si Feynman "no les habría lavado el cerebro" a los físicos. No amainó el garabateo ni siquiera cuando el marco teórico de la física sufrió un cambio radical. Para generaciones de teóricos educados desde el principio en esa herramienta favorita, los diagramas de Feynman eran lo primero cuando se trataba de abordar los cálculos.

La historia de la difusión de los diagramas de Feynman revela el esfuerzo necesario para crear instrumentos de investigación y preparar a quienes los pondrían en obra. La gran mayoría de los físicos que se valieron de los diagramas durante la década posterior a su aparición lo hizo sólo después de haber trabajado estrechamente con algún miembro de la red diagramática. Los posdoctorales que pasaban por el Instituto de Estudios Avanzados participaban allí en intensas sesiones de estudio y en cálculos realizados en colaboración. Después ocuparon plazas por Estados Unidos (y en otras partes), e instruyeron a sus propios alumnos en el uso de los diagramas. En una proporción aplastante, los físicos que permanecieron fuera de esta red no adoptaron los diagramas en sus investigaciones. El contacto personal y la formación individual siguieron siendo el medio predominante de circulación de los diagramas, incluso años después de que se hubieran impreso instrucciones explícitas para su empleo. No fue la circulación de textos, sino la enseñanza directa la que proporcionó el método más eficaz de inculcar la destreza necesaria para sacar provecho de los nuevos diagramas. Las tareas que los posdoctorales asignaban a sus alumnos a menudo se limitaban a pedirles que dibujaran los diagramas de Feynman apropiados para un problema dado, sin siquiera traducirlos a expresiones matemáticas. Esos alumnos aprendieron pronto que los cálculos empezaban por los diagramas.

Surgieron tradiciones locales. Los físicos jóvenes de Cornell, Columbia, Rochester, Berkeley y otras partes practicaron el dibujo y la interpretación de los diagramas de modos y con fines distintos. Estas apropiaciones diagramáticas guardaron cada vez menor semejanza con el proyecto original de Dyson. Su derivación a partir de principios básicos y reglas de traducción guiaron a los alumnos de Norman Kroll en Columbia, por ejemplo, pero se la consideró menos importante entre los estudiantes de Rochester; el grupo de Geoffrey Chew en Berkeley la ignoró. Los mentores eligieron los problemas en que se debía trabajar y los conocimientos que habían de adquirir sus alumnos. Como ocurre con cualquier instrumento, sólo entenderemos la difusión de los diagramas de Feynman entre los físicos si tomamos en consideración los contextos locales donde se utilizaron.

Sigue siendo imposible, por lo tanto, separar las prácticas de investigación de los medios con que se formó a los investigadores. En una generación, los diagramas de Feynman se convirtieron en la herramienta para calcular lo que fuese, de la electrodinámica y la física nuclear y de partículas a la física del estado sólido e incluso a disciplinas más alejadas de la aplicación original. Se logró con mucho trabajo pedagógico, de posdoctoral a posdoctoral, de mentor a pupilo. Los diagramas de Feynman no están en la naturaleza; los físicos teóricos no nacen, se hacen. Durante los decenios centrales del siglo XX, un mismo proceso pedagógico moldeó a aquéllos y a éstos.

El autor

David Kaiser ocupa la plaza de profesor asociado Leo Marx de historia de la ciencia del programa Ciencia, Tecnología y Sociedad del Instituto de Tecnología de Massachusetts, en cuyo departamento de física enseña también. Sus investigaciones se centran en la cosmología del universo primitivo.

Bibliografía complementaria

THE RADIATION THEORIES OF TOMONAGA, SCHWINGER, AND FEYNMAN. F. J. Dyson en *Physical Review*, vol. 75, págs. 486-502; 1949.

THE S MATRIX IN QUANTUM ELECTRODYNAMICS. F. J. Dyson en *Physical Review*, vol. 75, págs. 1736-1755; 1949.

THE THEORY OF POSITRONS. R. P. Feynman en *Physical Review*, vol. 76, págs. 749-759; 1949.

SPACE-TIME APPROACH TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS. R. P. Feynman en *Physical Review*, vol. 76, págs. 769-789; 1949.

FOURTH-ORDER CORRECTIONS IN QUANTUM ELECTRODYNAMICS AND THE MAGNETIC MOMENT OF THE ELECTRON. R. Karplus y N. M. Kroll en *Physical Review*, vol. 77, págs. 536-549; 1950.

QED: THE STRANGE THEORY OF LIGHT AND MATTER. R. P. Feynman. Princeton University Press; Princeton, N.J., 1985.

QED AND THE MEN WHO MADE IT: DYSON, FEYNMAN, SCHWINGER, AND TOMONAGA. S. S. Schweber. Princeton University Press; Princeton, 1994.

Norbert Treitz

Roberval y polipasto

Fuerza por brazo de la fuerza es igual a peso por brazo del peso. O bien: entre dos personas del mismo peso, se vencerá el balancín del lado de la que esté sentada más lejos. Tenemos tan arraigada la ley de la palanca, que la aplicamos sin pensar al sistema de Gilles Personne de Roberval (1602-1675). En la ilustración de esta página vemos construida una balanza de Roberval con piezas de mecano. Instintivamente, esperamos que el aparato se incline hacia un lado en cuanto pongamos algo más lejos uno de los pesos idénticos que cuelgan del mismo. ¡Y, sin embargo, no se inclinará!

No el aparato en sí, sino quienes sepan algo de física saldrán de su equilibrio (cognitivo), se arrancarán los pelos ("yo ya no entiendo la física") o se irán por las ramas con definiciones *ad hoc* si tienen que decir cuál es en este caso el brazo de la fuerza de modo que las leyes de la palanca sigan cumpliéndose.

Más desconcierta aún la sencillez con que se puede explicar algo que tan complicado parece. Está claro que, debido a su simetría, el aparato se encuentra antes de colgarle los pesos en un equilibrio indiferente. De su construcción se deduce, además, que una elevación de uno de los pesos va acompañada de un descenso igual del otro (el sistema global sólo tiene un grado de libertad). Para pesos iguales, el baricentro común no cambia de altura. Esto también vale si se cuelga uno de los pesos algo más hacia fuera, el otro algo más adentro o ambas cosas a la vez.

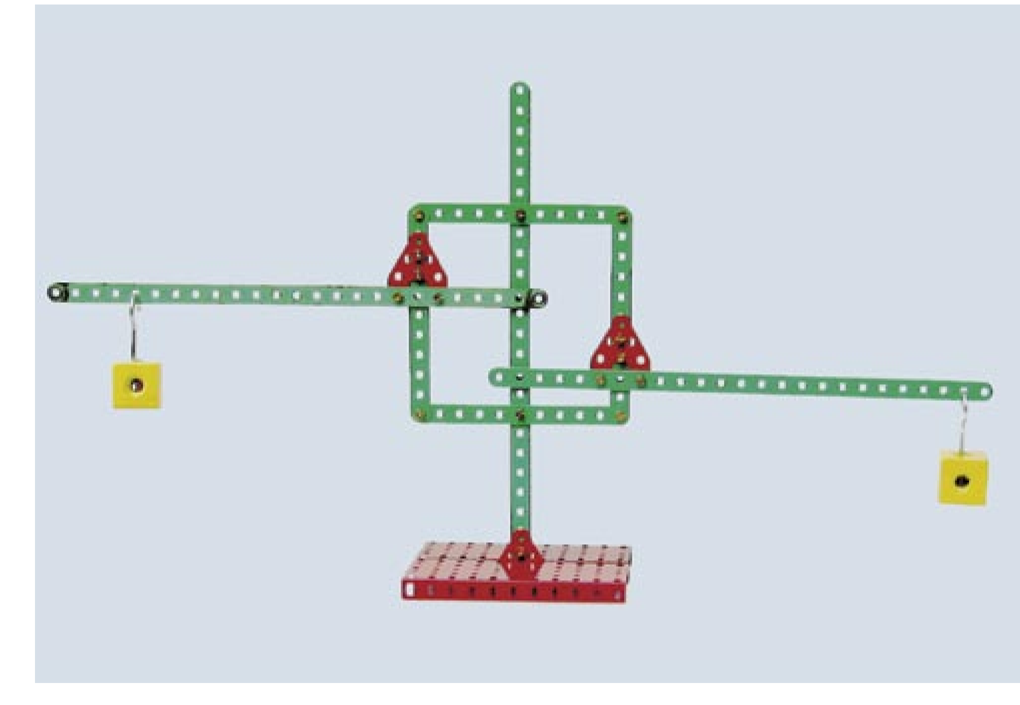
No se trata, pues, de brazos de palanca, sino de desplazamientos de alturas acopladas entre sí en el homogéneo campo gravitatorio. Sólo en el caso de la simple palanca de dos brazos (el balancín o la balanza de cruz) se encargan dos triángulos semejantes entre sí de que estos cambios en las alturas concuerden con las longitudes de los "brazos". Les vale a los físicos para definir, a partir de los brazos y de las fuerzas, el concepto poco elemental de momento angular.

El momento angular sólo deviene verdaderamente significativo cuando se llega a los límites de carga de una balanza. Antes de alcanzarlos, resulta más fácil tratar del equilibrio refiriéndose a las energías. En casos especialmente simples, nos llevarán a preguntarnos si el baricentro de las partes móviles sube o baja tras un desplazamiento infinitesimal ("desplazamiento virtual").

Energía potencial y de posición

Una pregunta en un cuestionario para ayudantes de laboratorios de física rezaba: "¿Está el baricentro de un sistema en equilibrio estable más bajo que en uno fuera del equilibrio?". La contestación correcta, según la relación de respuestas, era "sí". Desgraciadamente, la respuesta correcta, "a veces", no se previó.

Sólo será cierta de forma general la respuesta afirmativa en el caso de que la energía potencial decisiva sea la de un campo gravitatorio homogéneo. No ocurre así en una báscula de muelle. La energía potencial incluye, además del término del campo gravitatorio que crece linealmente con la altura, uno elástico que cambia cuadráticamente con la elongación o acortamiento del muelle respecto a su longitud natural. La suma de ambas energías tiene un mínimo a



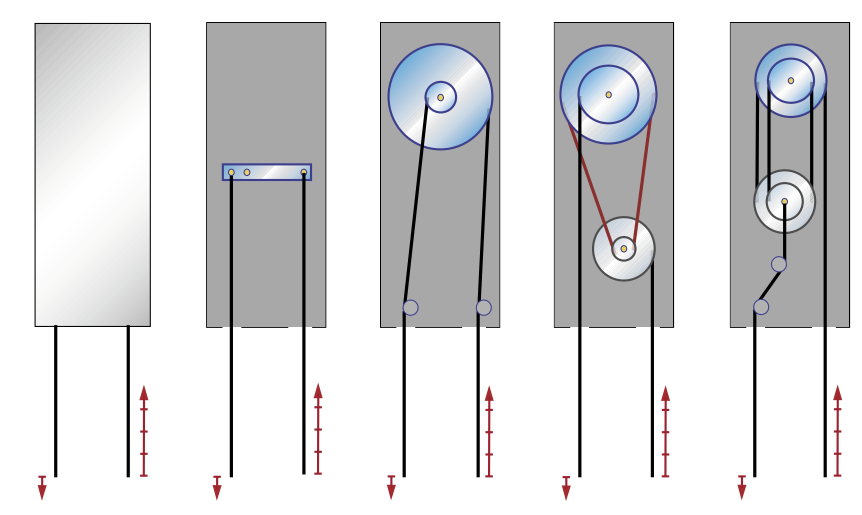
1. El sistema de palancas de Roberval (*izquierda*), construido con piezas de mecano. No importa de qué punto de las varas horizontales se cuelguen los pesos. Las barras pueden incluso atravesar al lado "equivocado", más allá del centro del aparato (*imágenes pequeñas*). *S* es el baricentro común de ambos pesos. A la derecha, una báscula decimal: basta contar los agujeros para ver que la plataforma con la carga que se pesa, a la izquierda, sube (*baja*) sólo una décima parte de lo que baja (*sube*) el platillo de la derecha con la pesa de medir.

una determinada altura, alrededor de la cual oscilará la carga en la báscula de muelle.

¿Son inelásticas las “rígidas” varillas de la balanza de Roberval? Y si tuvieran algo de elasticidad, ¿podríamos pasarlo por alto? Según la ley de Hook, la desviación x de un muelle es proporcional a la fuerza F aplicada: $F = kx$, con una constante k propia del muelle. La energía elástica es entonces $W = kx^2/2$, pequeña para x pequeños. Todo queda más claro si esa expresión se escribe $W = F^2/(2k)$: cuanto mayor sea la constante k (esto es, más fuerte sea el material), menos aporta la elasticidad al balance energético; en el caso ideal de unos cuerpos rígidos, absolutamente nada. Bajo la rúbrica “energía de posición” no queda claro, pues, si nos referimos sólo a la energía del campo gravitatorio (en el caso homogéneo, la energía proporcional a la altura) o a todo tipo de energías potenciales, en particular a las de la elasticidad.

Balanzas decimales y centesimales

La menor diferencia de pesos inclinará a un lado, al menos en teoría, la balanza de Roberval. Basta una aguja en una de las barras giratorias para convertir el equilibrio en estable o inestable. En la forma estable, el sistema de palancas de Roberval



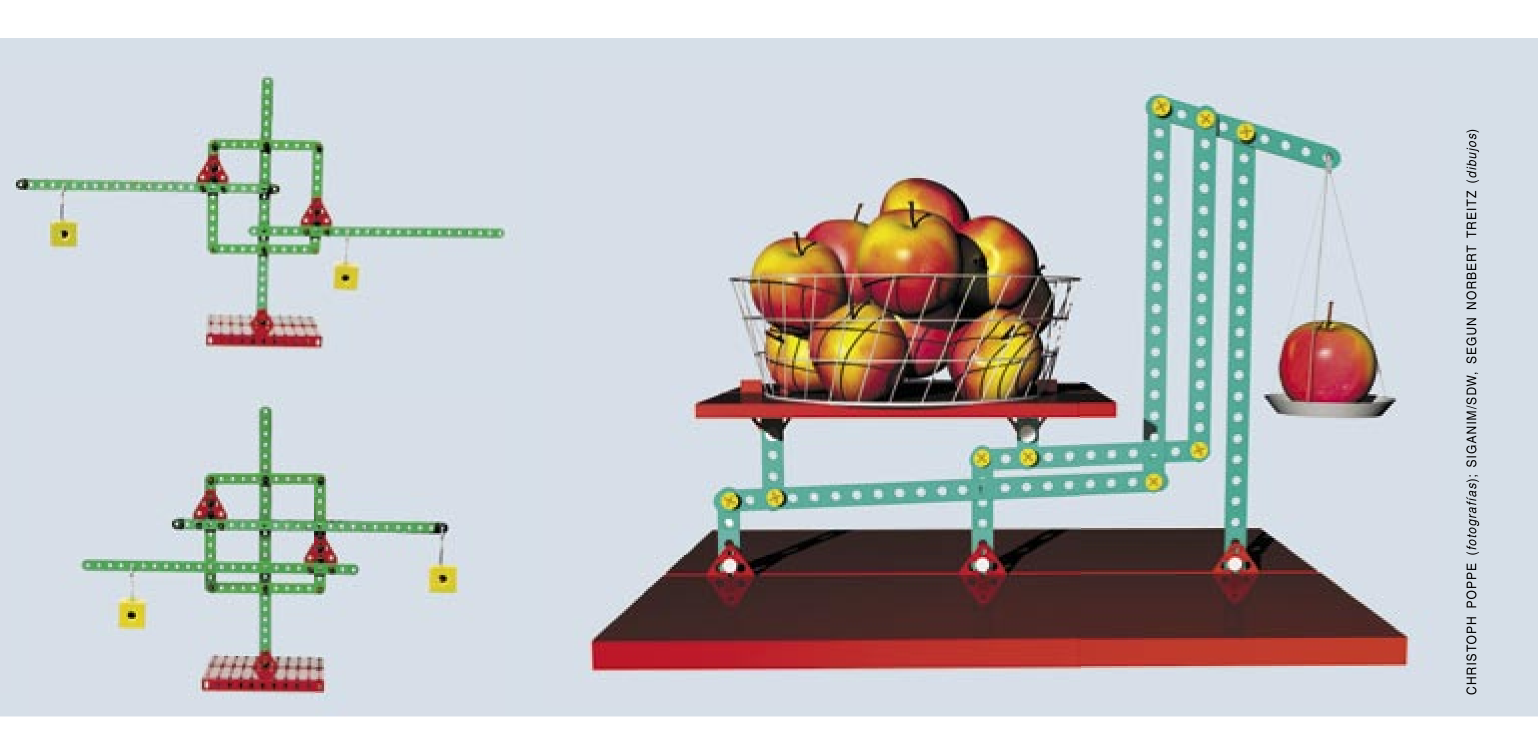
2. Diferentes tipos de sistemas multiplicadores/desmultiplicadores.

sirve de balanza de verdura en el mercadillo semanal. Como es bien sabido (¿o no?), da igual que las manzanas o las pesas se coloquen más adentro o más afuera. Los clientes se fían de la oficina de pesos y medidas, con razón, pues allí hay quienes entienden de física.

Para cantidades mayores, resulta más cómodo que no haya que manejar pesas de la correspondiente magnitud. Para eso se utilizan balanzas donde las pesas equilibran cargas diez veces mayores (báscula decimal). Una balanza de Roberval con esta propiedad tiene dos brazos, igual que cualquier balanza corriente, pero uno de ellos es diez veces más largo que el otro; los platillos, de todas formas, permanecerán horizontales en cualquier posición y podrían alargarse cuanto se quisiera hacia la izquierda o la derecha sin que cambiase el efecto de la carga que se pesa.

Para pesos muy grandes, por ejemplo un camión, son útiles las básculas centesimales (relación 1:100). Estrictamente hablando, este tipo de balanza sólo es indiferente cerca de la posición en que las barras están horizontales y verticales, pero los errores son muy pequeños.

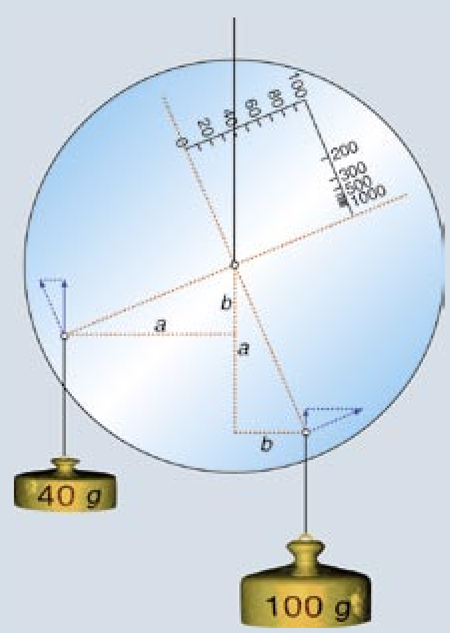
El lenguaje común a veces juega malas pasadas. En alemán equilibrio



CHRISTOPH POPPE (*fotografías*); SIGANIM/SDW, SEGUN NORBERT TREITZ (*dibujos*)

PESACARTAS ELEMENTALES

La lámina con la que se pesa no tiene que ser circular. Vale cualquier forma. Sí debe, en cambio, colgar exactamente de su baricentro. Su masa no entra en el resultado de la medición. La escala se ha confeccionado para que a la derecha cuelgue una pesa de 100 gramos.



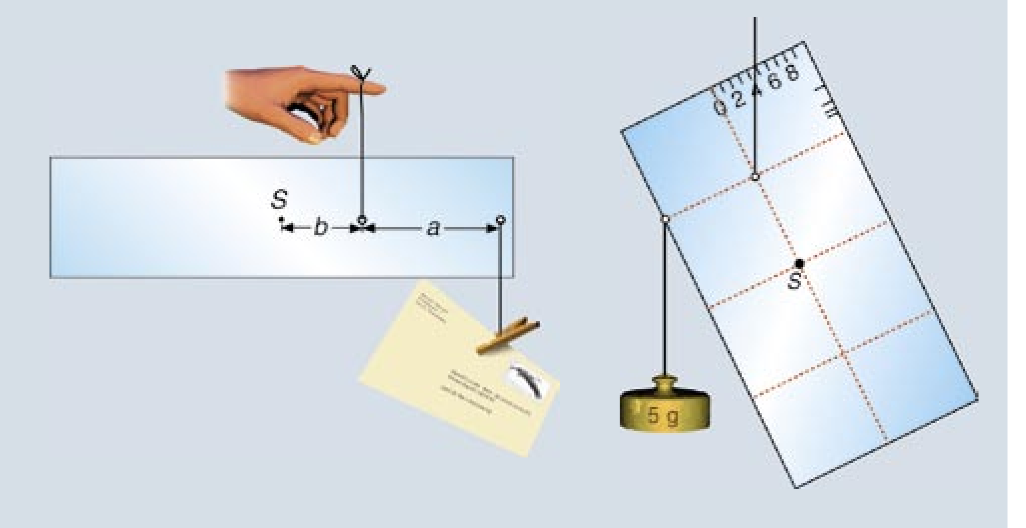
En la posición que se ve en la figura, los catetos de los triángulos rectángulos dibujados (semejantes entre sí) se comportan como los pesos colgados. Con un pequeño giro (exagerado por las flechas), la energía potencial permanece inalterada: lo que se añade al subir un peso se pierde con lo que baja el otro, pues las variaciones de las alturas son inversamente proporcionales a los pesos. Para giros mayores en uno u otro sentido, el peso que sube recibiría más energía que el que baja; habría, pues, que aportarla. El sistema formado por la balanza y el campo gravitatorio se encuentra en equilibrio estable.

La forma primitiva de esta balanza consiste en un simple rectángulo de cartón (*abajo a la derecha*). Se la puede descomponer mentalmente en una mitad superior y otra inferior. La superior está, como en el disco circular representado arriba, sobre el baricentro; la inferior hace de contrapeso.

Con un balance de los momentos angulares, medidos desde el eje central del disco, se obtiene el mismo resultado; eso sí, la descripción es más imponente.

Si además se desea introducir conocimientos aquí superfluos, podemos conferirle a la escala una forma de arco, un cuarto de círculo alrededor del centro, y verificar que la numeración se ha de determinar entonces por medio de las funciones tangente y cotangente: la escala lineal (y su extensión inversa) cae sobre tangentes de ese cuarto de círculo.

El pesacartas lineal utiliza la masa M de la regla como magnitud de referencia. A un lado de una recta que pasa por el baricentro S se practican varias perforaciones. La figura sólo nos muestra dos de ellas, a distancias a y b. Al inclinarse y salir de la horizontal, la balanza lineal nos muestra si la masa m que cuelga a la derecha es mayor o menor que Mb/a. Cada vez que cambie la tarifa postal, se puede practicar un nuevo agujero para la suspensión de la balanza y colgar siempre la carta del agujero de la izquierda.



se dice *gleichgewicht*, que literalmente significa “peso igual”. En el estado de equilibrio de una báscula decimal, o de cualquier palanca de brazos desiguales, los pesos no serán iguales. ¿Qué ocurre realmente en esos equilibrios de pesos desiguales? En un sistema con un solo grado de libertad, como una balanza, la energía potencial se expresa mediante una función de una sola variable, por ejemplo el ángulo de giro de la barra. El equilibrio se alcanza justo donde la gráfica de esa función tenga un punto horizontal: en el equilibrio estable será un mínimo, en el inestable un máximo. Si la gráfica es horizontal en un tramo, en él imperará un equilibrio indiferente.



Pesacartas

El clásico pesacartas de oficina con contrapeso basculante tiene igualmente un varillaje paralelográmico, al menos para el platillo sobre el que se pone la carta.

En la figura de abajo a la derecha del recuadro “Pesacartas elementales”. vemos un pesacartas simple, con un campo de medición teóricamente infinito. En la posición representada, el peso que cuelga pesa la mitad que el rectángulo. La escala es lineal desde 0 hasta el peso total del rectángulo; para el “resto” de pesos hasta el infinito, es lineal con respecto al valor inverso, pero por el otro lado del rectángulo.

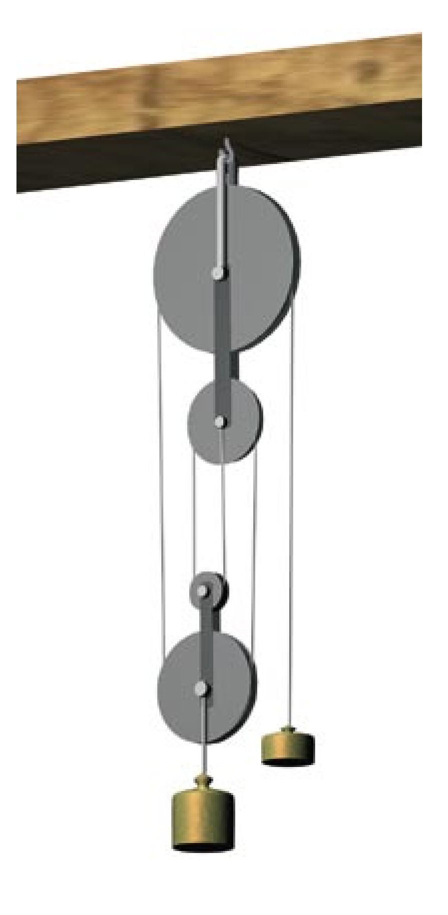
Para el porte de una carta sólo importa saber en qué intervalo de peso se encuentra. Una regla con perforaciones adecuadas y una pinza para colgar ropa construyen así un útil aparato.

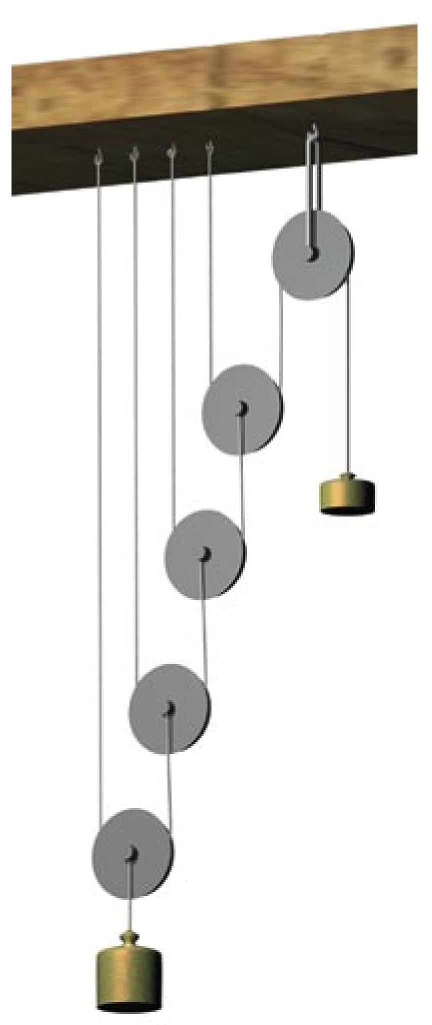
El juego de ruedas en la caja negra

De una caja salen dos hilos. Si se estira de uno la cantidad dh hacia abajo, el otro se moverá hacia arriba una cantidad $x \cdot dh$. ¿Cómo hay que

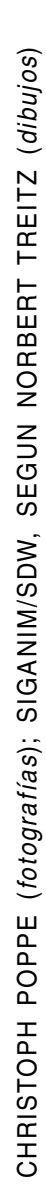
CHRISTOPH POPPE (*fotografías*); SIGANIM/SDW, SEGUN NORBERT TREITZ (*dibujos*)







3. Tres tipos de polipastos: a la izquierda el polipasto diferencial, en medio el típico y a la derecha el potencial (con potencias de dos). El grado de la multiplicación también se obtiene aquí de forma geométrica, a partir de las relaciones entre las variaciones de las alturas, siempre que se desprecie el peso de los correspondientes trozos de cuerda.



cargarlos para que haya equilibrio? Está claro que en una proporción *x*:1, o sea, inversamente a la variación de las alturas. Lo que hay dentro de la caja tiene diferentes nombres: torno, engranaje, multiplicador, polipasto o prensa hidráulica. En todas estas máquinas se puede determinar —como en un mecano, pero midiendo longitudes en vez de contar agujeros— la razón multiplicadora de los recorridos; de ahí se saca su valor inverso, que es la razón entre las cargas en equilibrio.

Con fuerzas o con momentos angulares sale lo mismo; ahora bien, al ser vectores, resulta más complicado que con la energía, un mero escalar. Con la energía siempre se sabe entre qué entes se transfiere, entre el campo gravitatorio y la manzana, por ejemplo. Por desgracia, es frecuente que se confunda eso con formulaciones del tipo de “se ha realizado un trabajo sobre la manzana”. ¿También realizamos pagos a la hucha o simplemente le metemos dinero?

Fuerzas y momentos angulares aparecen en estática y cuasiestática (movimientos con aceleración casi inexistente) por pares, que se compensan para dar cero: ¿tira la manzana del árbol, el árbol de la manzana o ambos de la rama? Nos engañamos cuando las fuerzas nos parezcan más intuitivas que las energías. Confundimos la función de nuestros músculos con el concepto físico de fuerza, que en ocasiones nos desconcierta incluso en el lenguaje técnico.

Un escritor dijo con cierta rechifla que los físicos son sujetos temibles: explican fenómenos incomprensibles con leyes de la naturaleza incomprensibles. No es falsa la aseveración; eso sí, sólo describe una mala enseñanza: por cada tipo de máquina simple, un experimento, una proposición y un ejercicio de cálculo. Los físicos son elegantes. Explican muchos fenómenos incomprensibles con muy pocas leyes de la naturaleza incomprensibles. Así se pueden explicar todas las máquinas simples conjuntamente: el equilibrio estable se da cuando cualquier posible desplazamiento de las partes requiere una entrada de energía potencial.

Que la naturaleza prefiera los mínimos de la energía potencial no es una ley natural en sí, sino una consecuencia del principio de la no disminución de la entropía (la segunda ley de la termodinámica): si la energía tiene la oportunidad de dispersarse, lo hará, y la casualidad casi nunca nos la traerá de nuevo. Detrás de sí deja equilibrios estables; sin esos procesos de fricción no habría sino oscilaciones y agitaciones eternas por doquier.

Juan M.R. Parrondo

Más paradojas de alternancia

Michel Steiver, de la Universidad de Colorado, me ha hecho llegar un ejemplo muy interesante en el que la combinación de dos juegos o inversiones perdedoras da lugar a un juego ganador. Un fenómeno similar a la *Paradoja de Parrondo*, de la que hemos hablado aquí en varias ocasiones. Esta vez el ejemplo está relacionado con situaciones bastante realistas que se dan en mercados financieros como la bolsa o los fondos de inversión.

Imagínense un cierto producto financiero, una acción de una empresa, un fondo de inversión, etc., que cada día da lugar o bien a una ganancia del 30 por ciento o bien a una pérdida del 25 por ciento del capital invertido. Es decir, cada euro invertido se convierte en un día, o bien en 1,30 o bien en 0,75 euros. Supondremos también que cada una de estas dos posibilidades ocurre con la misma probabilidad: 1/2. Este tipo de comportamiento se llama *modelo de árbol binomial* porque cada día pueden ocurrir dos posibilidades que hacen que las posibles evoluciones del precio de la acción a lo largo del tiempo crezcan como las ramas de un árbol. Se trata de un modelo muy simplificado de la evolución del precio de una acción que sirve para enseñar análisis financiero e incluso para hacer algunos cálculos del riesgo de una cierta inversión.

Da la impresión de que comprar esta acción o participar en este fondo es una inversión ganadora, puesto que la ganancia del 30 % es superior a la pérdida del 25 % y ambas posibilidades son igualmente probables. Un análisis más minucioso de cómo evoluciona el capital invertido nos mostrará que la inversión es bastante arriesgada. En la gráfica de la izquierda de la figura vemos seis posibles evoluciones del capital invertido. En cada una de las curvas se ha escogido aleatoriamente cada día la posibilidad ganadora, en la que el capital se multiplica por 1,30, o perdedora, en la que se multiplica por 0,75. Como cada día el capital se multiplica por un factor aleatorio, las fluctuaciones son bastante grandes. Vemos que, partiendo de un euro, una de las curvas sube hasta 10.000 euros. Sin embargo, todas ellas acaban bajando y se puede demostrar que, para un tiempo lo bastante largo, el capital se hace siempre prácticamente nulo.

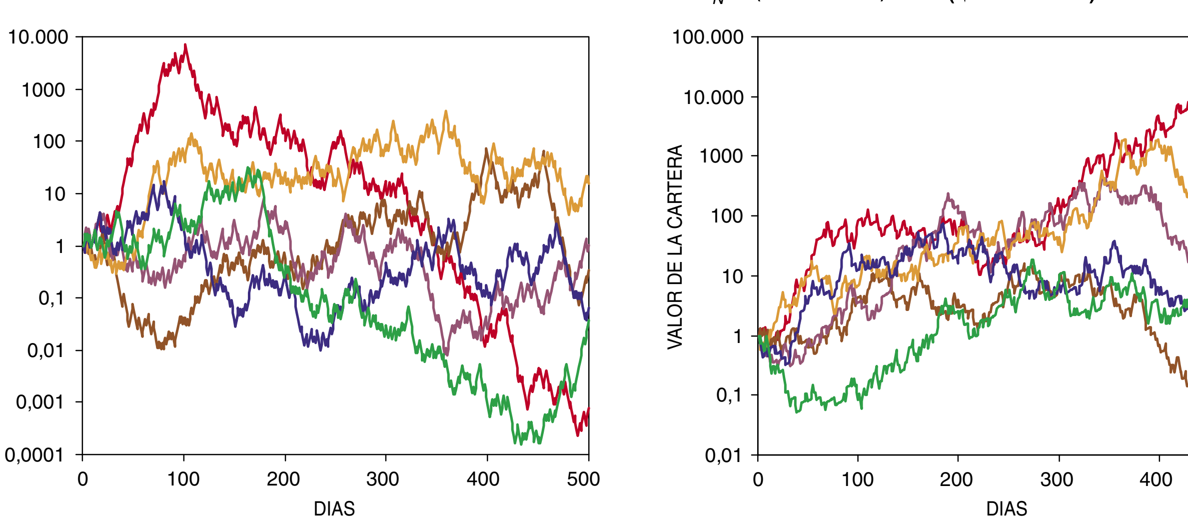
La idea de Steiver es combinar dos inversiones iguales a la anterior. Deben ser además completamente independientes, es decir, en un día una puede subir y la otra bajar, bajar ambas o subir ambas. El precio de cada una de estas acciones sigue una curva idéntica a las de la gráfica de la izquierda de la figura. Sin embargo, y éste es el curioso resultado de Steiver, si cada día distribuimos nuestro capital entre las dos acciones por igual, el resultado es el de la gráfica de la derecha en la figura. De nuevo observamos grandes fluctuaciones, pero el comportamiento de esta cartera de inversión combinada es bastante mejor que el del precio de cada acción por separado.

Veamos en detalle qué está ocurriendo. En primer lugar, analizaremos el precio de una sola acción, es decir, el comportamiento de las curvas en la gráfica de la izquierda de la figura; más tarde estudiaremos la inversión combinada. Si inicialmente el precio de la acción es de un euro, tras N días será:

$$P_N = 1{,}3^n \times 0{,}75^{N-n}$$

siendo n el número de días en los que el precio ha subido y $N - n$ el número de días en los que ha bajado. Tras un período largo de tiempo, lo más probable es que la mitad de los días el precio haya aumentado y la otra mitad haya disminuido. En ese caso, $n = N/2$ y el precio es:

$$P_N \simeq (1{,}3 \times 0{,}75)^{N/2} = \left(\sqrt{1{,}3 \times 0{,}75}\right)^N \simeq 0{,}987^N$$



Capital en función del tiempo para varias realizaciones de las carteras no diversificada (*izquierda*) y diversificada (*derecha*)

en donde hemos aplicado una conocida propiedad de las potencias: elevar a la mitad de un número N es lo mismo que extraer la raíz cuadrada y elevar el resultado a N. Por lo tanto, el precio tras N días, siempre en una trayectoria en la que el precio baja en la mitad de los días y sube en la otra mitad, es la potencia N-ésima de la *media geométrica* de los dos posibles factores, es decir, $\sqrt{1{,}3 \times 0{,}75} \simeq 0{,}987$, que es menor que la unidad. Al elevar a una potencia muy grande un número menor que la unidad, se obtiene una cantidad muy pequeña. Por lo tanto, la fórmula anterior indica que el precio se hace cada vez más pequeño, al menos en una trayectoria "típica", en la que el precio sube el mismo número de días que baja. Pero, ¿importan estas trayectorias "típicas"?

Ya hemos visto en la figura que el precio de la acción de nuestro ejemplo sufre grandes fluctuaciones. Algunas de las posibles trayectorias crecen mucho. Imagínense por ejemplo que, después de 100 días, el precio ha crecido 60 de ellos y ha decrecido 40. El precio final sería:

$$1{,}30^{60} \times 0{,}75^{40} = 664{,}47 \text{ euros}$$

que es muy alto. En la figura vemos también un caso en el que el precio ha subido hasta casi 10.000 euros en unos cien días (*curva roja de la gráfica de la izquierda*). Sin embargo, estas trayectorias son muy poco probables y se hacen aún más raras cuanto más avanza el tiempo, ya que entonces las fracciones de días de subida y bajada se aproximan ambas más a 1/2, haciendo que el precio sea cada vez más cercano a la fórmula que hemos deducido para la trayectoria típica. Por lo tanto, las trayectorias típicas consideradas no sólo son las más probables, sino que, para tiempos muy largos, resulta muy difícil que el precio se aleje mucho de ellas, como vemos en la figura.

Sin embargo, algún lector suspicaz podría argumentar lo siguiente. Si el precio de la acción en un día es x, al día siguiente será $1{,}30x$ con probabilidad 1/2 o $0{,}75x$ con probabilidad 1/2. Por tanto, el valor medio del capital al día siguiente es $1{,}025x$. En otras palabras, el valor medio del capital viene determinado por la media aritmética y no por la geométrica, y además crece día tras día. El precio de la acción es una cantidad aleatoria singular: ¡su valor medio crece, pero es cada vez más improbable que se aleje de cero! ¿Cómo reconciliar dos comportamientos tan opuestos? La respuesta está en esas trayectorias raras, aunque afortunadas. Algunas son extremadamente afortunadas y extremadamente raras, como, por ejemplo, la que resultaría de subir el precio todos los días. A pesar de que ocurren con una probabilidad insignificante, el precio alcanza en ellas un valor tan alto, que influye en la media, haciendo que crezca en lugar de disminuir. Esto ocurre incluso a pesar de que la gran mayoría de las trayectorias da lugar a precios ridículamente pequeños. ¿Con qué deberíamos quedarnos entonces? ¿Con la media o con el comportamiento típico? Creo que ninguno de los lectores lo dudaría, especialmente si se juega su propio dinero: uno espera que la acción siga un comportamiento típico, y la media, que en otros problemas de probabilidad sí desempeña un papel importante, aquí nos da una información distorsionada por las trayectorias afortunadas.

¿Qué ocurre con la inversión diversificada? En este caso, cada día repartimos todo el capital entre las dos acciones. Si tenemos un capital x, invertiremos en cada una de las dos acciones una cantidad $x/2$. Pueden ocurrir varias posibilidades. La primera es que las dos acciones suban un 30 %, con lo cual, el capital que tenemos al día siguiente es:

$$\frac{x}{2} \times 1{,}30 + \frac{x}{2} \times 1{,}30 = 1{,}30x.$$

Esta posibilidad ocurre con una probabilidad 1/4. Puede que ambas acciones bajen un 25 %, algo que ocurre también con una probabilidad 1/4 y tras lo cual el capital se reduce a $0{,}75x$. Finalmente, puede que una suba y la otra baje. En este caso, el capital pasa a ser

$$\frac{x}{2} \times 1{,}30 + \frac{x}{2} \times 0{,}75 = 1{,}025x.$$

Esta última posibilidad ocurre con una probabilidad 1/2, ya que da igual cuál de las dos suba y cuál baje. Repitiendo el argumento que elaboramos para el caso de una única acción, es fácil deducir que el capital después de N días es

$$x_N = 1{,}3^{n_{ss}} \times 0{,}75^{n_{bb}} \times 1{,}025^{n_{sb}}$$

en donde n_{ss} es el número de días en los que las dos acciones han subido, n_{bb} el número de días en los que ambas han bajado y n_{sb} el número de días en los que una ha subido y la otra ha bajado. Teniendo en cuenta las probabilidades respectivas de cada una de estas posibilidades, para un número N muy grande de días, una trayectoria "típica" de nuestra inversión da lugar al siguiente capital:

$$x_N = 1{,}3^{N/4} \times 0{,}75^{N/4} \times 1{,}025^{N/2} = \left(\sqrt[4]{1{,}3 \times 0{,}75} \times \sqrt{1{,}025}\right)^N = 1{,}006^N$$

y ahora el número que se eleva a N es mayor que uno, con lo cual, el capital crece indefinidamente. Observen que la media aritmética del factor por el que se multiplica el capital es la misma tanto para la inversión en una sola acción como para la inversión diversificada (en este segundo caso es $1{,}30/4 + 0{,}75/4 + 1{,}025/2 = 1{,}025$). Es decir, el valor medio del capital es el mismo tanto si invertimos nuestro dinero en una acción como si diversificamos la inversión. Sin embargo, la media geométrica, que, como hemos visto, es la importante para las trayectorias típicas, ha cambiado a nuestro favor.

¿Cómo es posible que la combinación de dos inversiones perdedoras dé lugar a una ganadora? Cuando repartimos el capital entre las dos acciones promediamos las ganancias conseguidas; el capital en una realización típica se acerca más a su valor medio. Si se combinan más de dos inversiones, el resultado es aún mejor. Pero conténganse a la hora de aplicar esta estrategia en bolsa. Aquí hemos partido del supuesto de que las dos acciones que se combinan evolucionan de forma independiente. Y en el mundo real hay fuertes correlaciones entre unos valores y otros. Especialmente cuando bajan todas las cotizaciones al unísono en una crisis financiera.

Mark Fischetti

PELOTAS DE TENIS

Variedad uniforme

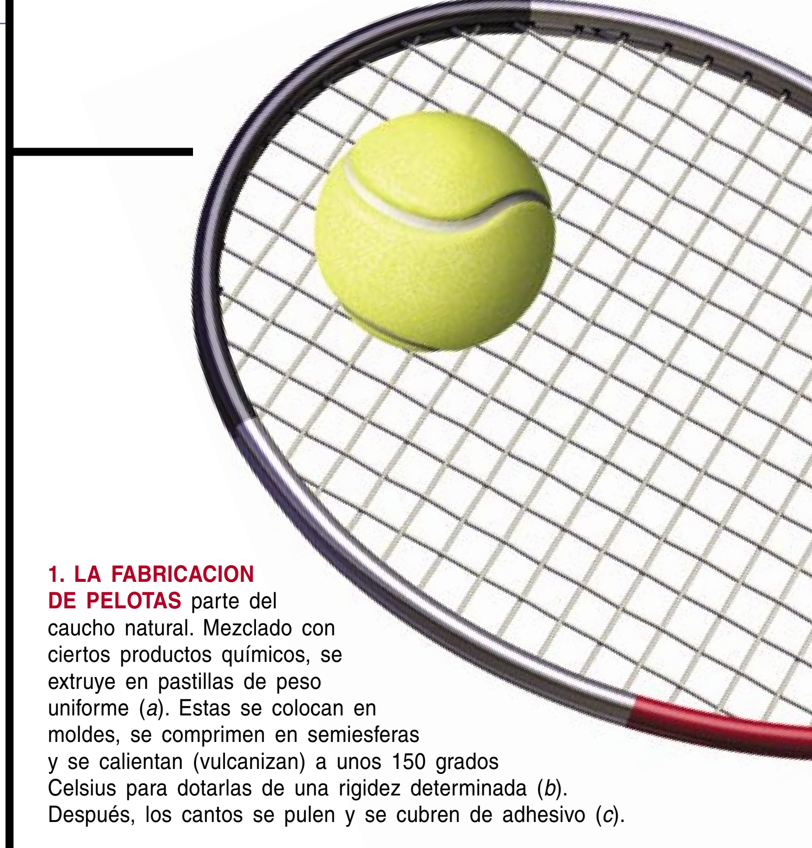
Más de 240 millones de pelotas de tenis se fabrican cada año en todo el mundo. Sorprende la uniformidad de esta producción si tenemos en cuenta que el caucho natural y la lana, sus materias primas, varían de un lote a otro y de un fardo a otro.

Para merecer el sello "oficial" de la Federación Internacional de Tenis, la pelota debe cumplir unas rígidas especificaciones respecto a la deformación y el rebote. De calidad variable, el caucho se combina con once productos químicos para obtener una pasta homogénea. Esta mezcla se comprime en moldes para formar el alma, o núcleo, de la pelota. Para conseguir un forro uniforme se teje un fieltro de lana, nailon y algodón; luego, se remoja, comprime y deseca.

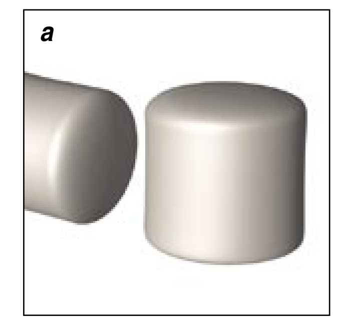
Por paradójico que parezca, en paralelo a tales esfuerzos por la uniformidad, la composición del alma y la longitud y la rigidez del pelo del forro se ajustan finamente para crear tres tipos de pelota: la rápida, para pistas lentas de tierra batida; la media, para pistas de cemento; y la lenta, para pistas rápidas de hierba. En EE.UU. se prefiere el juego rápido de las superficies duras, por lo que el aire encerrado en las pelotas se presuriza a unas dos atmósferas para hacerlas más sensibles. En Europa, muchos prefieren un juego más lento en canchas más blandas, por lo que las pelotas más vendidas son las "no presurizadas", que se sellan a una atmósfera.

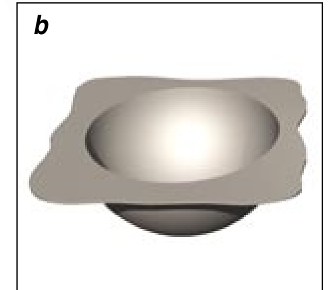
El forro es harina de otro costal. Steve Judge, vicepresidente de Tex Tech Industries, en Tempe, Arizona, explica que la mezcla de fibras utilizada y el proceso de tesura son distintos para las pelotas de tierra batida que para las de pista dura. El cordaje de la raqueta, por ejemplo, agarra mejor un pelo largo; éste, a su vez, aumenta la resistencia del aire. Por otro lado, parece que los europeos prefieren el aspecto de una pelota más densa.

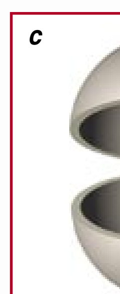
Cuenta también la "frescura". En función del juego, el aire encerrado en una pelota presurizada se abre paso lentamente a través del alma y el forro, produciendo un tacto "fofo" tras algunos meses. Para mantener vivas las pelotas, los fabricantes las empaquetan en envases sellados a algo menos de dos atmósferas de presión. Esa proximidad al equilibrio impide que el aire del alma se escape, al tiempo que contribuye al agradable sonido que acompaña la apertura del envase.



1. LA FABRICACION DE PELOTAS parte del caucho natural. Mezclado con ciertos productos químicos, se extruye en pastillas de peso uniforme (*a*). Estas se colocan en moldes, se comprimen en semiesferas y se calientan (vulcanizan) a unos 150 grados Celsius para dotarlas de una rigidez determinada (*b*). Después, los cantos se pulen y se cubren de adhesivo (*c*).









2. LAS MEDIAS PELOTAS se enfrentan por parejas acercando las mortajas en las que se han introducido (*vista general*). El aire contenido en éstas se presuriza a dos atmósferas. Luego, una prensa comprime las mortajas una contra otra para que el adhesivo selle las mitades y atrape el aire a alta presión. Para vulcanizar el cierre, se calienta la cámara. El "alma" de la pelota, ya terminada, se enfría con agua y se libera de la mortaja (*d*).

GEORGE RETSECK

¿SABIA USTED QUE...?

➤ **INTERNACIONALES:** El caucho natural para pelotas de tenis se vulcaniza (se trata químicamente para fijar su rigidez y durabilidad) mediante un proceso similar al que se sigue en la manufactura de neumáticos. El fabricante británico Dunlop Slazenger vulcaniza los núcleos en Filipinas empleando arcilla de Carolina del Sur, sílice de Grecia, azufre de Corea del Sur, óxido de zinc de Tailandia y carbonato de magnesio de Japón, entre otros productos.

➤ **DOS, TRES O CUATRO:** Todo depende de la cultura. Los estadounidenses compran envases de tres pelotas. En Japón, en cambio, los tubos encierran un par. Y los europeos prefieren latas de cuatro bolas —quizá porque les encanta jugar a dobles.

➤ **EN AMARILLO:** Durante muchos años, las pelotas de tenis fueron blancas. Pero en los años setenta del siglo pasado los fabricantes se pasaron al amarillo fosforescente para hacerlas más visibles sobre el fondo verde de las canchas, el azul del cielo, el indumento blanco de los tenistas y la vestimenta colorida de los espectadores.

➤ **SENSIBILIDAD EXTREMA:** Más de 70.000 pelotas se utilizan cada año en el Open de Estados Unidos. Cada una se emplea sólo en nueve juegos de un partido; luego se reemplaza. El jugador que falla en su primer servicio suele buscar una pelota de pelo más denso que se agarre mejor a la raqueta para que ésta le dé más efecto y asegurarse así el segundo intento. Las pelotas usadas se dan a la beneficencia.



ESPECIFICACIONES OFICIALES

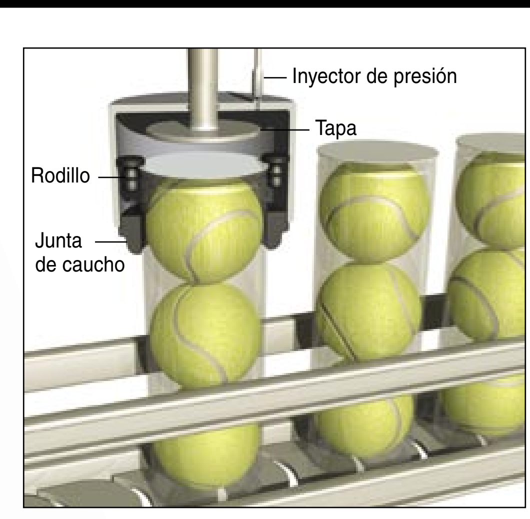
Rebote
De 134,6 a 147,2 cm (cayendo desde una altura de 254 cm)

Dureza
Deformación de 0,559 a 0,737 cm bajo compresión por una carga de 8,165 kg

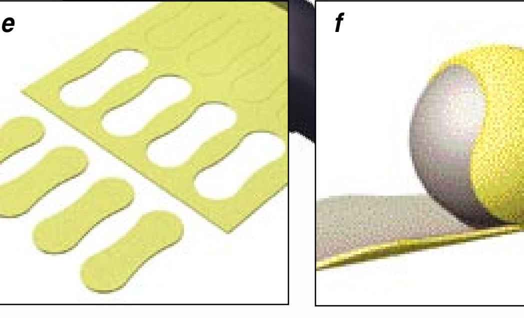
Peso
Entre 56,0 y 59,4 g

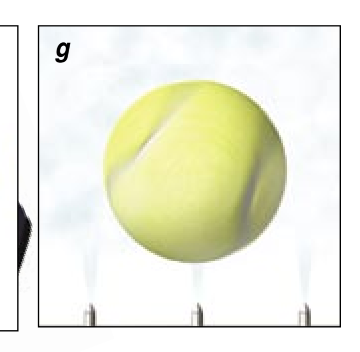
Diámetro
De 6,53 a 6,89 cm

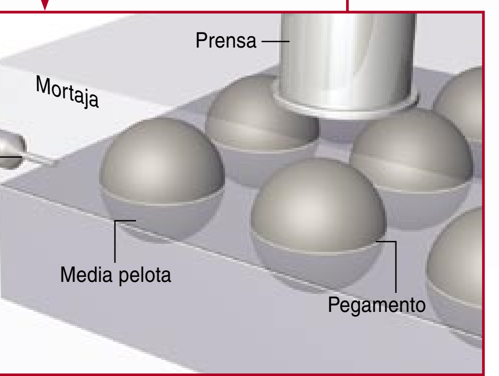
Nota: Valores fijados por la Federación Internacional de Tenis para pelotas de velocidad media.



4. LOS BOTES DE PELOTAS, todavía sin cerrar, se introducen en una cámara. Se inyecta aire a presión, al propio tiempo que desciende una tapa de aluminio. Por fin, unos rodillos plisan el metal y el plástico formando con ellos un pliegue estanco al aire.







3. EL FORRO se hace de un hilado de lana mezclada con nailon. Este se teje con hilo de algodón, que lo refuerza. A continuación, el tejido se remoja y se pasa entre rodillos para comprimir las fibras y obtener una superficie afieltrada. El fieltro se seca en estado de tracción para conferirle la tesura deseada. El reverso de largos rollos de fieltro se reviste de adhesivo termoactivado. Para cada pelota se cortan dos contornos en forma de "hueso" (*e*), se comprimen sobre el alma y se tratan térmicamente (*f*). Las pelotas acabadas se introducen en un tambor giratorio, donde se inyecta vapor para cardar el fieltro.

Paleoantropología

Orígenes humildes

THE APE IN THE TREE. AN INTELLECTUAL AND NATURAL HISTORY OF *PROCONSUL*, por Alan Walker y Pat Shipman. The Belknap Press of Harvard University Press; Cambridge, Massachusetts, 2005.

LOWLY ORIGIN. WHERE, WHEN, AND WHY OUR ANCESTORS FIRST STOOD UP, por Jonathan Kingdon. Princeton Universty Press; Princeton, 2003.

DRAGON BONE HILL. AN ICE-AGE SAGA OF *HOMO ERECTUS*, por Noel T. Boaz y Russell L. Ciochon. Oxford University Press; Oxford, 2004.

L'ACHEULÉEN. DE L'*HOMO ERECTUS* À L'HOMME DE NÉANDERTAL, por Alain Truffeau. La Maison des Roches; Tours, 2004.

Procedemos de unos orígenes muy humildes, Darwin *dixit* y Kingdon, experto en mamíferos africanos, lo ha razonado (*Lowly Origin*). Cierto es que nuestro libro de familia, el que reseña nuestra pertenencia al hombre moderno, abre sus páginas en fecha bastante reciente: hace unos seis millones de años, cuando, según el reloj molecular y las pruebas paleontológicas, nos separamos de los chimpancés. (Catorce millones de años antes, habían bifurcado sus caminos simios y monos.) Fue un distanciamiento instado por una fuerte presión de selección expresada a través del volumen cerebral. Pero no todos los cambios morfológicos experimentados por nuestro linaje se han debido a selección natural. Dando por cierto que la evolución sigue operativa, el crecimiento medio de la talla de los ciudadanos de los países desarrollados, a lo largo del último siglo y medio, se atribuye sin reservas a una dieta mejor. El propio rostro de nuestros congéneres, que conoció drásticas transformaciones en los postreros 3 millones de años, vale decir, de los australopitecinos al hombre moderno, podría deberse no tanto a la presión de selección cuanto a la deriva genética.

Con los chimpancés y con bonobos, gorilas, orangutanes, siamangs y gibones, el hombre moderno comparte un inmediato antepasado. Por tal se toma a *Proconsul*, el simio más antiguo conocido del registro fósil, pues se remonta a unos 18-20 millones de años; está también representado por los restos más completos de un simio fósil, con varios esqueletos parciales. Por ambos motivos ha merecido, desde los primeros hallazgos 75 años atrás, una investigación incesante de los paleontólogos que en él se han fundado para construir sus tesis históricas, taxonómicas, morfológicas, ecológicas y filogenéticas (*The Ape in the Tree. An Intellectual and Natural History of* Proconsul).

Arthur Tindell Hopwood impuso en 1933 el nombre de *Proconsul* a un curioso maxilar izquierdo fósil descubierto en Koru, que él supuso precursor del chimpancé; el espécimen le sirvió para definir género y especie (*Proconsul africanus*). Rendía homenaje a "Consul", un chimpancé habilidoso que actuó a principios del siglo XX en el Folies Bergère. Tal era la destreza e "inteligencia" de éste, que se convirtió en punto de referencia y aval del parentesco entre humanos y simios. Hopwood disponía sólo de la mandíbula y algunos dientes. En 1948 se descubrió un cráneo formidable; dos años más tarde, se desenterró un brazo casi completo y huesos de los pies. En 1950 y 1951 Wilfrid Le Gros Clark y Louis Leakey incrementaron el número de especies con *P. nyanzae* y *P. major*. A finales de ese mismo decenio, apareció la monografía de John Napier *The Fore-limb Skeleton and Associated Remains of* Proconsul africanus (1959), sobre un esqueleto parcial de *Proconsul* procedente de la isla de Rusinga, que aportaba una descripción morfológica minuciosa con particular atención a las funciones correspondientes. Napier, mentor de Walker, ejerció una influencia determinante en los estudios primatológicos de mediados del siglo XX. Sépase que en el estudio de la morfología funcional convergen diversas disciplinas: la morfología se interpreta en razón de la función asignada, la función en términos de comportamiento y el comportamiento a través de su interacción con el medio.

La atracción de ese simio del Mioceno no decaía. En 1965, Elwyn Simons y David Pilbeam revisaron el registro de fósiles y sugirieron una propuesta arriesgada: *P. major* sería precursor de los gorilas; *P. nyanzae*, precursor de los chimpancés, y *P. africanus,* precursor de los humanos. En los años ochenta, trabajando en las islas de Rusinga y Mfangano del Lago Victoria, Walker recuperó numerosos individuos, incluidos esqueletos parciales de niños, juveniles y adultos, machos y hembras. Al final de la campaña de campo de 1987 habían conseguido buena parte del esqueleto de nueve individuos de *Proconsul africanus* y un diente de un décimo sujeto. Los individuos inmaduros eran fáciles de identificar porque retenían algunos dientes de leche y todas las epífisis de sus huesos largos estaban sin fundirse. Mediados los noventa, Walker aumentaba el grupo con la incorporación de la especie *P. heseloni*. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que, a diferencia de los simios modernos, que están separados por barreras geográficas de diversa índole, los grandes simios del Mioceno no sólo vivían contemporáneamente, sino que eran especies simpátricas.

Para determinar las relaciones filogenéticas los paleontólogos dis-

ponen de diversos recursos metodológicos, si bien la mayoría opta por la cladística. En su aplicación, consiste el primer paso en ir anotando la mayor cantidad posible de rasgos del espécimen; en los fósiles: número y tipos de dientes, emplazamiento de caracteres anatómicos de los huesos del cráneo y de las extremidades, etcétera. Los rasgos listados se contarán por centenares si nos encontramos con especímenes completos, muchísimos menos si sólo hay restos fragmentarios. Parece evidente que la fiabilidad de la clasificación aumentará si hablamos de un elenco copioso de caracteres. En la perspectiva cladística, cada carácter es, en principio, un rasgo del tipo "sí/no", es decir, presente/ausente. Esa partición entraña dificultades manifiestas: los primates del Viejo Mundo poseen, en general, el mismo plan esquelético (igual número y tipos de dientes, dedos y extremidades y los mismos huesos del cráneo), lo que significa que existen pocos rasgos del tipo sí/no. Introducidos los datos en el ordenador, se manipulan a través de programas que van agrupando a los individuos en razón de sus afinidades. La estructura ramificada resultante se denomina cladograma.

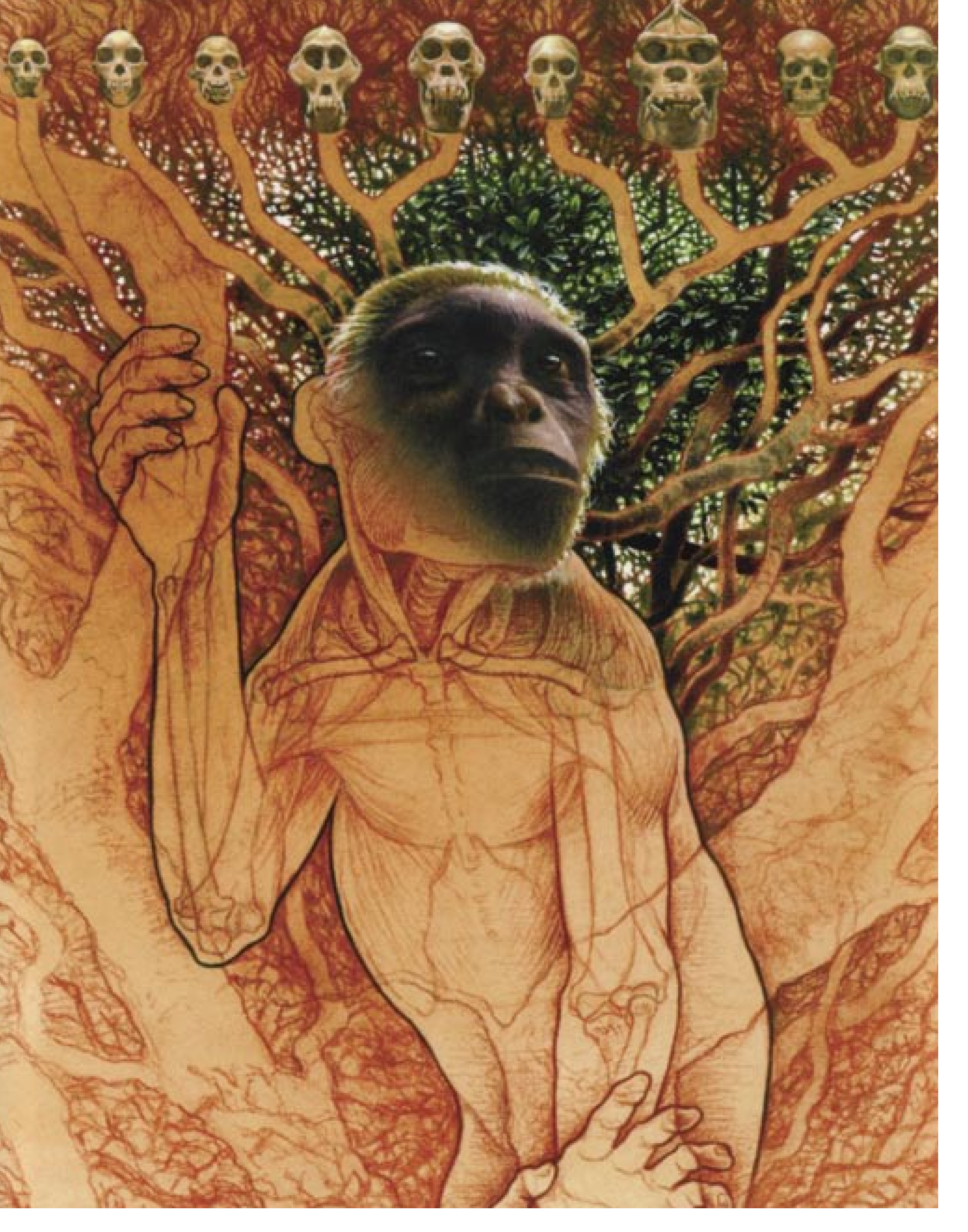
En cada punto de ramificación existe un nodo, o punto de divergencia, definido por el carácter o conjunto de caracteres que aparecieron en ese momento de la evolución. Los cladogramas deben leerse de izquierda a derecha. Las especies primitivas, ancestrales, caen a la izquierda del cladograma; las derivadas, a la derecha. Por atractivo que resulte imaginarlo, el cladograma no constituye en puridad un diagrama genuino de evolución; muestra sólo el patrón general de ramificación que ha ocurrido entre los caracteres, no el patrón de ramificación de las especies. Pero al menos en teoría, cladograma y filogenia "diagrama de parentescos evolutivos" convergen hacia la identidad. Con todo, la cladística no se halla exenta de limitaciones: el resultado está condicionado por la selección de los rasgos que se enumeran; el método se circunscribe a reconocer el cambio evolutivo que provoca un desdoblamiento o un suceso de especiación; y, por último, no suele tomar en consideración el tiempo, lo que implica dejar de lado una variable importante en la identificación de cualquier fósil. Limitaciones aparte, la cladística permite responder cuestiones fundamentales, del tenor de qué sea un simio, qué sea un mono y similares.



1. Cráneo de *Proconsul* hallado en 1948.

Qué sea lo genuinamente humano se empieza conociendo por los pies, por el movimiento erguido. Dedicado a ese rasgo, estudiado en numerosas ocasiones y en múltiples artículos, tenemos gracias a Kingdon un primer libro de conjunto (*Lowly Origin*). Parece incontrovertible que, en cuanto nuestros antepasados pudieron andar sobre dos pies, acometieron tareas imposibles para los simios: cruzar anchos espacios abiertos, manipular útiles complejos, comunicarse mediante nuevos sistemas de señales y encender fuego. Desde Darwin, para quien la postura erecta marcaba la línea divisoria entre el hombre y el resto del mundo animal, se ha venido ofreciendo un sinnúmero de explicaciones sobre el bipedalismo. Para el más eminente de los naturalistas victorianos, la postura erguida se adaptaría para liberar las manos en el marco de un hábito de vida que había dejado de ser arbóreo. Según los defensores de la hipótesis del "móvil hacia arriba", los simios arbóreos de cuerpo pequeño modificaron su escalada vertical para avanzar bípedamente sobre las ramas grandes de la bóveda del bosque. Para otros, el bipedalismo nace de la necesidad de acarrear niños, comida y objetos hasta el campamento base. Para evitar los predadores, aducen quienes ven en la postura erguida la ventaja de un dominio visual de la sabana. De exhibición sexual, hablan unos; de exhibición de intimidación, hablan otros. Hay quien propone una fase acuática de forrajeo o sencillamente una estrategia de defensa en el agua, contra los depredadores. Por su parte, la teoría termorreguladora del bipedalismo, harto extendida, justificaba esa adaptación en los habitantes de la sabana, que se levantarían en pie para mantenerse fríos. En la misma onda se buscó una razón energética: dos pies resultaban más rentables que cuatro.

El lento proceso hacia la bipedestación exigió cambios en la médula espinal, pelvis, articulación cabeza-cuello y talón de Aquiles. Transformaciones que propiciaron una etapa previa de postura en cuclillas, de claro éxito en la alimentación en la sabana o en los suelos del bosque. Es la tesis de Kingdon. Se trata de una explicación más plausible que la tradicional, según la cual el ponerse en pie constituiría un acto breve de balanceo que ampliaba



2. *Proconsul* en su árbol filogenético. Creación artística de Dohn Gurche.

las adaptaciones cuadrúmanas y arbóreas del antepasado común de simio y hominino. En el tránsito del hábito cuadrúmano al bípedo, la evolución hubo de superar hasta cuatro barreras: erguirse, mantener el equilibrio sobre dos piernas, andar y correr.

De acuerdo con el registro fósil, el tipo particular de bipedismo de los simios que dio origen a los humanos apareció en Africa. Existen indicios de anagénesis (evolución unilineal) en el registro fósil hominino del Mioceno tardío. En dicho continente, hace unos seis millones de años, emergió *Ardipithecus kadabba*, un hominino. Para ser más precisos, *A. kadabba* representa una transición entre chimpancés (con caninos poderosos) y *Ardipithecus ramidus, Australopithecus* y *Homo* (con caninos irrelevantes). *A. ramidus* debió de vivir hace entre 5,8 y 4,4 millones de años. Presentaba un esmalte dentario muy fino que le acerca a los simios; probablemente no era una especie completamente bípeda, aunque sí intermedia entre los cuadrúmanos y bípedos. Algo más reciente, *Australopithecus anamensis*, u homínido de Kanapoi, que se supone medró hace unos 4,1 millones de años. Del género la especie más famosa es *Australopithecus afarensis*, “Lucy”, de 3,6 millones de años. Los australopitecinos pudieron ser los primeros adelantados de la deambulación bípeda y, con ello, pioneros de la vía que llega a nosotros. La transformación evolutiva que parte de los australopitecinos y conduce a *Homo* supuso, entre otros cambios, la reducción de una dentición maciza y musculatura masticatoria. Los australopitecinos presentaban, en efecto, grandes dientes y notables músculos masticatorios, que se insertaban en unos huesos faciales robustos.

Otro candidato para constituir el punto de arranque de la humanidad fue *Kenyanthropus platyops*, cuyos restos fósiles se datan en 3,5 millones de años y cuyos molares eran de tipo humano. Aunque no se sabe cómo andaba, su hábitat en las riberas del lago Turkana abona la idea de un modo de vida en el suelo. Se disputa también la idoneidad de *Homo habilis* para incoar el linaje humano. Sus restos fósiles se han fechado entre hace 2,3 y 1,7 millones de años. Con *H. habilis*, la especie *Homo rudolfensis*, que vivió entre hace 2,4 y 1,85 millones de años, evidencia una decidida tendencia hacia un mayor volumen cerebral.

El primer hominino en abandonar el continente africano fue *Homo erectus*. Se propagó por Java y China (*Dragon Bone Hill. An Ice-Age Saga of* Homo erectus). En Africa, donde los primeros fósiles datan de hace 1,8 millones de años, esta forma recibe el nombre de *Homo ergaster*, aunque familiarmente los representantes de Asia y de Africa se conocen por *erectus*. (En cualquier caso, sólo la línea africana dio origen a los humanos modernos.) A lo largo de unos dos millones de años, individuos de *Homo erectus* vagaron por doquier, fabricaron hachas y otros útiles de piedra, idearon probablemente algún medio de navegar y aprendieron a dominar el fuego (*L'Acheuléen. De l'*Homo erectus *à l'homme de Néandertal*). Fue precisamente el uso del fuego lo que les permitió su pronta dispersión de un lado a otro de Asia. El registro fósil disponible nos enseña que *Homo erectus* fue un oportunista que se subió a una ola de cambio ambiental fuera de Africa y hacia Eurasia, en una serie discontinua de saltos poblacionales. Por las trazas dejadas, eran brutales en una agre-

sión ritualizada, aunque se adivinan también retazos de compasión. El cerebro pequeño de *Homo erectus* y su cultura extrañamente inmóvil revelan que la especie no conocía el lenguaje, pese a lo cual sobrevivió 1,5 millones de años, mucho más que el armado con un control del fuego y algunas lascas de piedra, *Homo erectus* sobrevivió increíblemente 1,5 millones de años, mucho más que el tiempo que lleva nuestra especie sobre la Tierra.

Los descubrimientos de restos de homínidos realizados en la Colina de los huesos de dragón (Dragon Bone Hill), Longgushan en chino, un yacimiento paleoantropológico de singular valor en el segundo tercio del siglo XX, sito cerca de la ciudad de Zhoukoudian, han constituido el centro de hipótesis sobre los orígenes del dominio del fuego, de los comienzos del lenguaje humano, la evolución del cerebro, caza, canibalismo, uso de útiles líticos y óseos y dieta primitiva. En el camino hacia la simplificación seguido por los especialistas, viejos nombres de género como *Sinanthropus* o *Pithecanthropus* de los fósiles orientales han terminado absorbidos entre las especies arcaicas de un solo género *Homo*. En efecto, el registro fósil da pie para defender que la transición de *Homo habilis* a *Homo erectus* sucedió en un frente evolutivo muy amplio de Africa a Eurasia. En ese contexto, el *Homo erectus* de China descendería de un inmigrante reciente venido de Africa; es decir, evolucionaría *in situ* en Extremo Oriente, producto de una diferenciación plenamente regional. En la transición *Homo erectus ergaster* a *Homo erectus erectus* en Eurasia asistimos a una sustitución en clinas, vale decir, de un modelo de cambio evolutivo gradual.

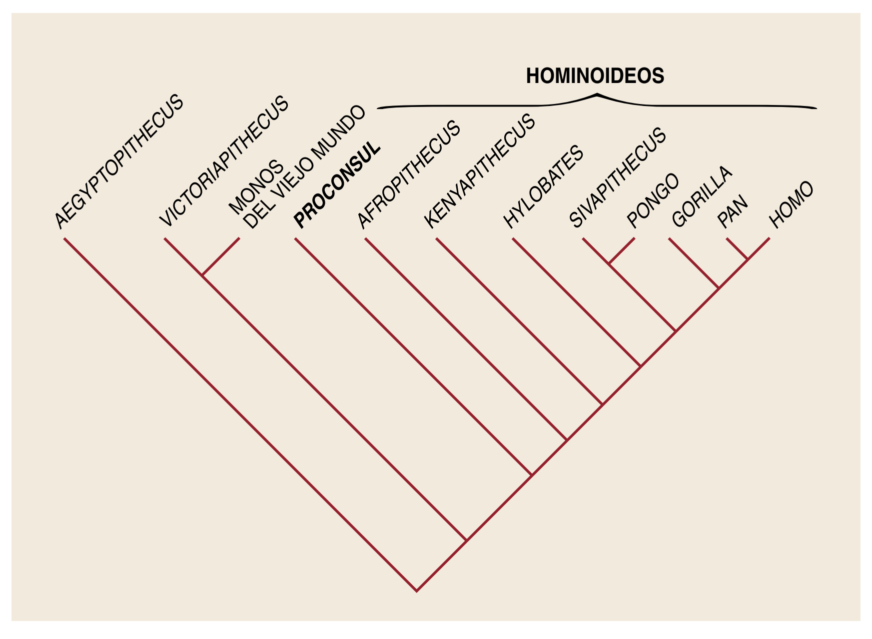
Para el caso de los fósiles de *H. erectus* procedentes de Longgushan, las calibraciones de la serie del uranio, resonancia de espín electrónico, análisis paleomagnéticos y cronología de curvas isotópicas del paleoentorno, amén de registros de sedimento de loess, cifran su antigüedad entre 410.000 y 670.000 años.

La investigación en Longgushan quedó frustrada con la subida de Mao Tse-tung al poder en 1949. Parecía arruinada la fortuna de *Homo erectus* iniciada en los años veinte, cuando en 1960 Louis Leakey encontró una bóveda craneana en Olduvai, que encajaba perfectamente con los cráneos de Longgushan. Tenía 1,4 millones de años. Ese descubrimiento africano refutaba, además, la hipótesis de la ascendencia gigante de *Homo sapiens*, que una interpretación errónea de los fósiles chinos había promovido. No cabía la menor duda de que los homínidos que nos precedieron eran chaparros, aunque, en el caso de *Homo robustus*, dotado de un cráneo sumamente poderoso, paquistótico. El neurocráneo, globular, refleja, asimismo, un aumento del volumen cerebral.

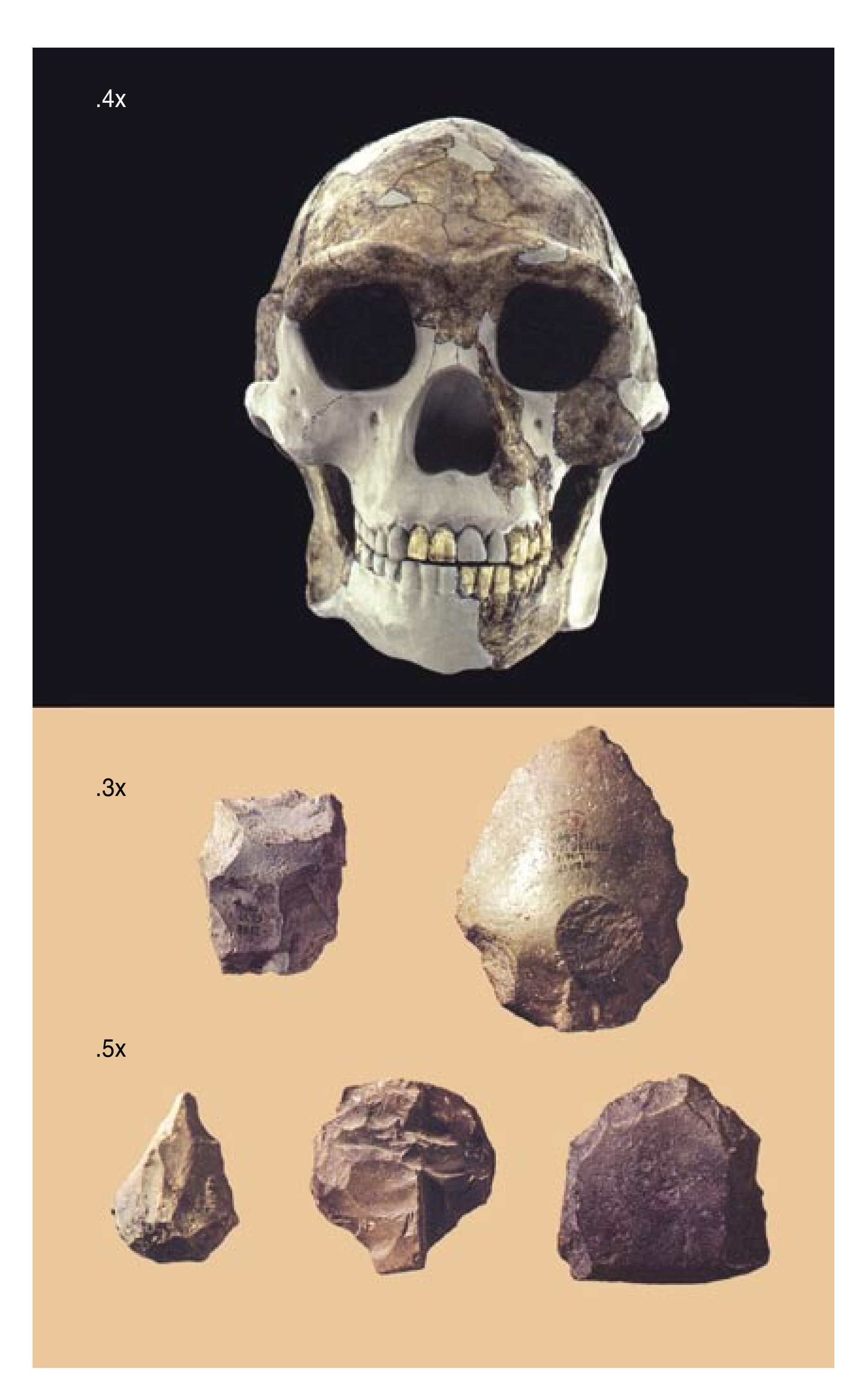
A *Homo erectus* y su dispersión se halla directamente vinculada la cultura achelense, aunque no en Longghushan, cuya industria lítica, desde los estudios de Pierre Teilhard de Chardin, suele repartirse entre lascas pequeñas y raederas. (La Colina de los huesos de dragón, sin embargo, constituye uno de los



3. Reconstrucción artística de *Proconsul heseloni* que decora el Museo Americano de Historia Natural de Nueva York.



4. Cladograma en el que se refleja la posición basal, o primitiva, de *Proconsul*.



5. Reconstrucción del cráneo de *Homo erectus* procedente de Longgushan, con algunas piezas de su industria lítica.

primeros yacimientos en que queda demostrado el dominio del fuego. Lo avalan los huesos fósiles carbonizados y piedras cuarteadas por las altas temperaturas.) El Achelense debe su nombre a un barrio de Amiens, Saint-Acheul. Se caracteriza por la industria de la piedra bifaz, que elaboran en una amplia diversidad morfológica, si bien se identifica con facilidad por sus dos caras talladas. El resto del utillaje, realizado sobre esquirlas, resulta a menudo muy basto. Las industria achelense más antigua, de 1,5 millones de años de antigüedad, se descubrió en Olduvai, en Africa oriental. Algunos sostienen incluso que el Achelense se derivaría del Oldovayense por evolución morfológica de raederas ovaladas y picos bifaces. Su llegada a Europa es tardía; hace sólo unos 600.000 años. Fueron los hombres del Achelense los primeros en colonizar las regiones de las latitudes elevadas, hasta el paralelo 52, del noroeste de Europa. El Achelense se sitúa, pues, en la fase antigua del Cuaternario, denominada Pleistoceno (inferior y medio), que, con el Terciario, constituye el Cenozoico, la última era geológica.

Una forma modificada de *Homo erectus*, conocida por *Homo heidelbergensis*, emergió hace un millón de años y 600.000 años en Africa y se difundió por Eurasia. En Europa, *Homo heidelbergensis* evolucionó en los humanos poderosos de gran cerebro de la edad del Hielo, los neandertales, que supieron adaptarse a los hábitats fríos septentrionales de Asia Occidental y Europa. En Africa, los humanos anatómicamente modernos evolucionaron a partir de otra población de *H. heidelbergensis*, aunque la zona exacta de Africa, la causa y el mecanismo siguen envueltos en el misterio. De los estudios de genética parece inferirse que nuestros antepasados superaron una suerte de cuello de botella genético. Y apenas comenzamos a intuir cómo se dispersaron los modernos fuera de Africa y alcanzaron su diversidad actual.

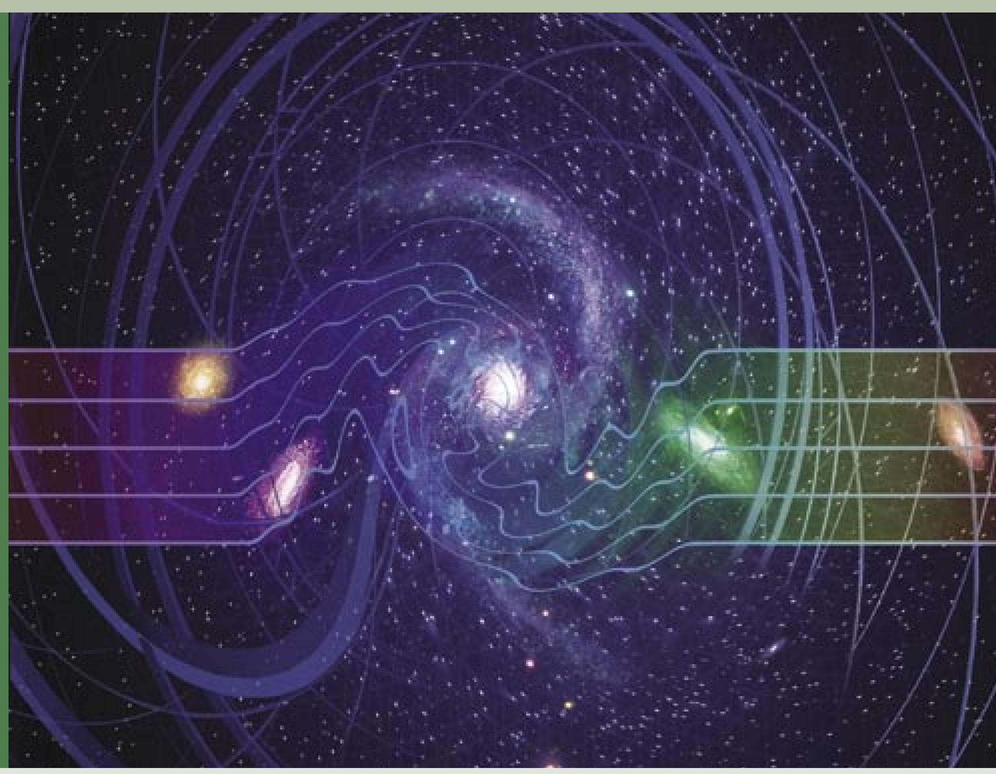
En su perduración de unos 1,2 millones de años, el Achelense fue obra del *Homo erectus, Homo heidelbergensis, Homo sapiens neanderthalensis* y *Homo sapiens* arcaico. No se trata de un fenómeno único. Está perfectamente demostrado, para períodos más recientes, que no existe correlación directa entre diferente tipos humanos contemporáneos y las culturas: neandertales y primeros hombres modernos compartieron la misma cultura material, las industrias líticas mousterienses del comienzo del último período glacial. Mostraron igualmente el mismo comportamiento hacia los muertos, como lo evidencia el descubrimiento de sepulturas de hombres modernos, en Qafzeh (Israel) y neandertales, en Shanidar (Irán). En Europa las industrias líticas del Achelense persisten hasta hace unos 200.000 años.

—Luis Alonso

EN EL PROXIMO NUMERO...

...DE OCTUBRE 2005





DISONANCIA COSMICA, por Glenn D. Starkman y Dominik J. Schwarz

Las observaciones de la radiación cósmica de fondo difieren de las predicciones teóricas. ¿Dónde está el error, en las mediciones o en nuestra concepción del universo?



DIENTES PROBETA, por Paul T. Sharpe y Conan S. Young

El cultivo de dientes abriría nuevas vías para la obtención de órganos de mayor tamaño, a la vez que daría paso a la odontología regenerativa.



LA APARICION DE LA SIMETRIA BILATERAL, por David J. Bottjer

Microorganismos fósiles revelan que la simetría bilateral, hito clave en la evolución de la complejidad biológica, apareció antes de lo que se venía admitiendo.



DESARROLLO DEL PENSAMIENTO SIMBOLICO, por Judy S. DeLoache

Los niños confunden los objetos reales y el símbolo que los representa. Este y otros errores revelan las dificultades que entraña el aprendizaje de la simbolización.

GOTAS NANOSCOPICAS DE HELIO A BAJAS TEMPERATURAS, por M. Barranco, R. Mayol, J. Navarro y M. Pi

Constituyen un laboratorio idóneo para el estudio de la superfluidez y otros procesos físicos fundamentales. Ofrecen interesantes aplicaciones en el dominio de la espectroscopía molecular y la síntesis química.

